

Université de Sherbrooke



31156008110366

QE
193
L33
1999
G
thèse

**Structures géologiques et linéaments, Beauce (Québec) :
apport de la télédétection**

Gilbert Lachaine , 1957-

I-16 96

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès
sciences (M.Sc.) en géographie, cheminement Télédétection

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

juin 1999

© Gilbert Lachaine, 1999

BIBLIOTHÈQUE U.S.

**Structures géologiques et linéaments, Beauce (Québec) :
apport de la télédétection**

Gilbert Lachaine

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès
sciences (M.Sc.) en géographie, cheminement Télédétection

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

juin 1999

© Gilbert Lachaine, 1999

Directeur de recherche : Q. Hugh J. Gwyn

Membres du jury :

Dong Chen He (Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke)

Robert St-Jean (MIR Télédétection)

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Résumé

Structures géologiques et linéaments Beauce, (Québec) : apport de la télédétection

Gilbert Lachaine

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M. Sc.) en géographie, cheminement Télédétection

Les images infrarouges et radars provenant de capteurs satellitaires contiennent beaucoup d'information de nature géologique. Un des moyens d'étudier les structures géologiques consiste à mettre en évidence et analyser les linéaments repérables sur ces images. De nombreuses méthodes ont été proposées. Ce projet vise à apporter une information sur les structures et la géologie qui soit complémentaire aux connaissances présentes sur le territoire étudié. La région de la Beauce présente un paysage rural et des caractéristiques du couvert végétal différents des régions nordiques souvent ciblées par ce genre de recherche. Des rapports géologiques couvrent une partie de la région et de nombreux indices minéralogiques indiquent un potentiel minéral incitant à plus de recherches.

Le travail se divise en deux blocs d'opérations réalisées simultanément. Le premier bloc consiste à traiter les images disponibles (TM de Landsat 5 et RSO de RADAR-SAT-1) afin d'obtenir une carte des linéaments. Le deuxième bloc est la mise sur pied d'un système d'information géographique (SIG) intégrant les cartes topographiques et géologiques avec une base de données contenant les valeurs requises pour les différents traitements et leur résultat. L'analyse de la carte des linéaments se fait à l'intérieur de ce SIG.

Un rehaussement destiné à augmenter la visibilité des linéaments sur l'image TM a donné le meilleur résultat. Le repérage visuel des linéaments s'est avéré le plus adapté aux caractéristiques de la zone d'étude. Une analyse de la carte des linéaments indique que leur densité linéaire augmente selon un gradient régional orienté vers le nord-ouest. Le terrain à l'est de la faille de La Guadeloupe présente une densité de linéaments plus faible. Cette faille sépare donc la zone d'étude en deux domaines de densité différente. L'orientation de ce gradient coïncide avec celle du mouvement tectonique responsable de la formation des Appalaches.

Les linéaments présentent deux directions principales, orientées nord-sud et est-ouest. Leur nombre est à peu près le même dans chacune de ces deux directions. Un troisième groupe, plus restreint, est orienté du sud-ouest vers le nord-est. Dans la

portion sud de la zone d'étude, ce groupe est relié aux contacts lithologiques visibles. Les indices géochimiques répertoriés ont tendance à se situer à proximité immédiate d'un linéament. L'association de ces indices avec les zones de densité élevée de linéaments est cependant imprécise.

Ce projet a permis de tracer une carte des linéaments qui semble être la première couvrant cette région. Elle est donc perfectible. Une recherche couvrant un territoire plus grand ou visant à un repérage plus complet est recommandable. Il est suggéré à cet effet de privilégier les bandes infrarouges des capteurs TM (ou ETM+). L'utilisation d'une séquence multi-date augmenterait les possibilités d'interprétations.

Abstract

Infrared and radar satellite images contain a great deal of information. One of the ways to study geological structures is to enhance the data and analyse the lineaments located in the images. Numerous methods have been proposed. This project attempts to provide information on the structures and the geology which will be complementary to our present knowledge of the study area. The Beauce region is a rural area with a mixed vegetation cover that is different from that found in northern wilderness areas, which are the usual targets for this kind of mineral prospecting. Geoscience reports are available for part of the area and the numerous mineral indicators are an invitation to further mineral prospecting in the area.

The Study is divided into two stages, which were carried out in parallel. The first stage consist of analysing the available Landsat TM and RADARSAT-1 SAR images in order to produce a map of the geological lineaments. The second stage consisted of creating a geological information system (GIS) which includes the topographic and geological data as well as the available ancillary data. The analysis of the maps was done within the GIS.

A spatial enhancement of the TM image gave the better results compared to the RADARSAT-1 image. Visual identification of the lineaments seemed better adapted to the characteristics of the study area. Analysis of the lineament map shows that the linear density increases regionally towards the north-west. The terrain to the east of the Guadeloupe Fault has a lower lineament density. The Fault separates the study area into two domains with different lineament densities. The orientation of the gradient coincides with the tectonic movements related to the formation of the Appalachians.

The lineaments fall into two dominant directions: north-south and east-west with about the same number of lineaments in each set. A third and smaller set of lineaments is oriented southwest-northeast. In the southern part of the study area, this group is related to visible lithologic contacts. The geochemical indicators are clearly related to the mapped lineaments. However, their association with areas with a higher density of lineaments is unclear.

To our knowledge, this study has produced the first lineament map of the region. It now need to undergo refinement. A more detailed study covering a larger area alongstrike is recommended. It is also recommended that the infrared bands of Landsat TM (or ETM+) be used. Finally, a multitemporal sequence would assist in the interpretations.

Table des matières

Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iii
Liste des annexes	iii
Remerciements	iv
1. Introduction	1
2. Cadre de la recherche	3
2.1. Considérations préliminaires	3
2.1.1. Une perspective lithologique	3
2.1.2. Une perspective structurale	4
2.2. Définition	5
2.3. Origine des linéaments	5
2.4. Travaux antérieurs	6
2.4.1. Problématique du repérage des linéaments	6
2.4.2. Méthodes proposées	8
2.5. Objectifs	10
2.6. Hypothèses	11
3. Région d'étude	12
3.1. Critères de sélection	12
3.2. Topographie	16
3.3. Hydrographie	16
3.4. Géologie	17
3.4.1. Structures géologiques	17
3.4.2. Lithologie	20
4. Matériel et méthodes	22
4.1. Les images utilisées	22
4.1.1. Image RSO de RADARSAT-1	22
4.1.2. Image TM de Landsat 5	23

4.2. Méthodologie	25
4.2.1. Recherche bibliographique	25
4.2.2. Compilation géologique	25
4.2.3. Système d'Information Géoscientifique	27
4.3. Traitement de l'image RSO	29
4.3.1. Filtrage	29
4.3.2. Correction géométrique	30
4.3.3. Filtres directionnels	32
4.3.4. Seuillage et images binaires	34
4.4. Traitement de l'image TM	35
4.4.1. Analyse en composante principale (ACP)	35
4.4.2. Correction géométrique	37
4.4.3. Rehaussement des linéaments	38
4.4.4. Traçage des linéaments	39
5. Analyse de la carte des linéaments	42
5.1. Reconnaissance visuelle	42
5.2. Statistiques de la carte des linéaments	43
5.3. Rosaces directionnelles	45
5.4. Grille d'analyse	50
5.5. Densité linéaire	53
5.6. Croisements	53
5.7. Analyse par surface de tendance	53
5.7.1. Analyse de la densité linéaire	54
5.7.2. Analyse de la densité des croisements	55
5.8. Indices géochimiques et linéaments	63
6. Discussion	67
6.1. Interprétation structurale	67
6.2. Interprétation gîtologique	69
6.3. Discussion sur l'image RSO	70
6.4. Discussion sur l'image TM	71

7. Conclusion	72
8. Références	73

Liste des figures

1.	La région d'étude, un secteur de la Beauce, Québec.....	13
2.	Les quatre cartes couvrant la région d'étude.....	14
3.	Carte géologique de la région d'étude	19
4.	Organigramme de la méthodologie.....	26
5.	Organigramme du traitement de l'image RSO.....	31
6.	Filtres directionnels Sobel 5 x 5.....	33
7.	Organigramme du traitement de l'images TM.....	36
8.	Carte des linéaments.....	41
9.	Rosace directionnelle de la carte des linéaments.....	46
10.	Rosaces, découpage de la carte en secteurs.....	47
11.	Rosaces directionnelles des trois domaines géologiques.....	48
12.	Rosaces des sept zones circulaires.....	49
13.	Grille d'analyse, cellules de 2 km.....	52
14.	Densité linéaire des linéaments.....	56
15.	Carte des croisements.....	57
16.	Densité des croisements.....	58
17.	Surface de tendance de la densité linéaire des linéaments.....	59
18.	Surface des résidus, densité linéaire.....	60
19.	Surface de tendance de la densité des croisements.....	61
20.	Surface des résidus, densité des croisements.....	62
21.	Localisation des indices géochimiques.....	65
22.	Voisinage de résidus positifs et indices géochimiques.....	66

Liste des tableaux

1.	Caractéristiques de l'image RSO.....	23
2.	Caractéristiques de l'image TM	24
3.	Composantes du SIG.....	27
4.	Statistiques de la carte des linéaments.....	44

Liste des annexes

1.	Cartes à l'échelle de 1:125 000.....	78
----	--------------------------------------	----

Remerciements

Je remercie premièrement Francine pour son support dans ce projet et pour la patience dont elle a fait preuve tout au long de mon retour aux études. Sans elle, tout cela n'aurait tout simplement pas été possible.

Je remercie particulièrement Monsieur Paul Archer et Monsieur André Gaumond de la société Mines d'Or Virginia, de Québec, pour leur contribution financière au projet et pour l'attitude positive qu'ils démontrent envers la formation et la recherche universitaire.

Merci à Monsieur Robert Marquis, chef du service géologique au Ministère des Ressources naturelles du Québec, pour avoir orienté le projet initial et pour le don des images de RADARSAT-1 et de Landsat 5.

Merci à mon directeur de mémoire, Monsieur Q. Hugh J. Gwyn pour m'avoir laissé la liberté de choisir mon projet selon mes aspirations et pour son aide précieuse dans les nombreuses étapes de ce projet.

Je remercie également Monsieur Paul-André Chassé pour son support informatique, et tous ceux et celles qui m'ont aidé à différentes occasions.

1. Introduction

Dès l'apparition des photographies aériennes, l'étude des structures et des formations géologiques fut en mesure de profiter grandement de cet outil apportant une vision d'ensemble et permettant la perception de phénomènes presque totalement invisibles par un observateur au sol. La venue des satellites et, plus précisément, l'apparition de capteurs donnant des images dans une plus grande étendue du spectre vint renforcer les possibilités offertes aux chercheurs.

Dans le cas d'images prises par des capteurs satellitaires, le processus conduisant à une meilleure connaissance du sujet étudié sur la surface terrestre devient un peu plus compliqué. Les images sont captées dans des portions du spectre qui excèdent les limites du visible. Il se pose alors le problème de trouver le traitement le plus approprié pour l'image, celui qui mettra en évidence ce que l'on cherche à voir. Ce qui est visible sur l'image devra être interprété en considérant que l'information est peut-être partielle en ce qui concerne le phénomène précis que l'on cherche à qualifier. Dans le cas du présent projet ce phénomène a un nom, c'est le linéament.

En fait, l'essentiel de ce projet de recherche se résume à l'étude des structures géologiques par le moyen de l'analyse des linéaments détectables sur des images satellitaires. Les travaux antérieurs utilisant cette méthode montrent des résultats compatibles avec ceux obtenus par d'autres moyens, tels que les analyses géochimiques (Pouliot, 1987). La recherche de gisements minéraux peut donc bénéficier d'une approche utilisant la télédétection des linéaments comme étape intégrée à des recherches sur le terrain. Les recherches fondées sur les linéaments présentent une grande variété de méthodes de détection et d'interprétation. Plusieurs se concentrent sur le développement d'algorithmes. Dans le cas de ce projet, l'aspect appliqué est prédominant. Une bonne partie du travail consiste à trouver le traitement qui est le plus adapté aux caractéristiques du territoire étudié. C'est ce traitement qui permettra d'atteindre les objectifs fixés au départ.

L'objectif principal de ce projet est d'apporter une information qui puisse compléter les connaissances disponibles sur les structures géologiques du territoire étudié. Cet objectif ne peut se réaliser que si l'hypothèse suivante se vérifie dans sa plus grande partie. Les linéaments visibles sur les images satellitaires de la surface terrestre recèlent principalement une information sur les structures géologiques de la zone observée. Les ouvrages publiés sur ce sujet tendent à démontrer que cette hypothèse est tout à fait raisonnable (Scanvik, 1986).

Dans ces conditions, il est permis de dire que l'apport théorique de cette recherche est de valider et confirmer un peu plus l'approche utilisant les linéaments comme source d'information sur la géologie d'un territoire. La portée pratique du projet est beaucoup plus marquée. Une première partie de la portée pratique est l'apport d'information utile pour compléter la carte géologique du territoire visé. L'autre partie est de nature économique. En effet, le potentiel minéral de l'endroit suscite l'intérêt persistant de compagnies d'exploration. Les résultats spécifiques obtenus dans ce projet pourraient avoir une influence sur les activités des prospecteurs dans la région. Cette éventualité serait, si l'on peut dire, une reconnaissance de la validité de l'approche du problème présenté dans les chapitres suivants.

Il faut préciser enfin qu'une méthode de recherche par télédétection ne peut se substituer aux autres méthodes existantes de prospection. Il faut y voir un moyen de mieux préparer le terrain à une recherche classique et aussi un moyen de guider ou d'orienter l'étude au sol qui est considérablement plus dispendieuse.

2. Cadre de la recherche

2.1. Considérations préliminaires

Les capteurs satellisés donnent une image de la Terre remplie d'information sur une variété de phénomènes présents en surface, sous la surface et dans l'atmosphère. La grande valeur de ces images découle de deux qualités spécifiques aux capteurs satellitaires. La première qualité est qu'ils présentent une vue synoptique de la surface terrestre. En d'autres mots, leur grand éloignement permet de saisir l'ensemble du sujet. Certains phénomènes difficilement perceptibles par l'humain circulant au sol, pour des raisons d'échelle, deviennent alors aisément visibles. La deuxième qualité vient du fait que les différents capteurs couvrent des portions du spectre électromagnétique qui sont en dehors du spectre visible. L'information contenue dans l'infrarouge ou la bande radar C est différente de celle du visible. Un traitement d'image et une analyse appropriée révéleront des éléments nouveaux qui compléteront l'information acquise dans la bande visible. Toutes les sciences ayant comme objet un aspect de la surface terrestre peuvent donc tirer profit des capteurs satellisés et de la télédétection en général. La lecture d'un ouvrage de synthèse sur ce sujet, comme celui de Bonn et Rochon (1993), en convaincra le lecteur.

2.1.1. Une perspective lithologique

Dans une étude appliquée à la géologie, on peut considérer que l'information présente dans l'image se présente sous deux aspects. Le premier aspect est lié à la surface rocheuse en tant que surface. C'est, si l'on peut dire, l'information lithologique. On cherchera donc à caractériser les roches de cette surface par leurs propriétés radiométriques dans l'étendue du spectre ou par d'autres propriétés, comme la texture, si l'on ne dispose que d'une seule bande spectrale. La bande radar C, entre autres, peut faire l'objet d'une analyse de texture. L'objection la plus fréquente émise

par les gens, lors de discussions sur ce sujet, est que le socle rocheux est masqué par la présence de dépôts meubles et d'un couvert végétal. La réalité est plus complexe en ce sens que la nature des produits d'altération de surface et la végétation sont influencées par le type de sous-sol autant sur le plan physique que sur le plan chimique ou biochimique. Par exemple, la réponse dans le domaine spectral (la signature) d'une forêt et sa texture sur l'image satellitaire varieront selon la nature des roches sous-jacentes. Cela semble normal si on considère que cette roche est le matériel de base servant à la génération du sol dans lequel croît cette forêt. L'information sur la lithologie est donc accessible malgré le couvert végétal. Parfois, le couvert végétal souligne les différences lithologiques. La détermination dans l'image de différentes classes spectrales permet, dans ces conditions, une cartographie géologique. Elle exige cependant une interprétation adéquate, guidée par une connaissance *a priori* du terrain, et acquise de façon classique. Les mêmes considérations s'appliquent à l'information structurale recherchée sur une image.

2.1.2. Une perspective structurale

Le deuxième aspect de l'information est apporté par les lignes de contact entre les différentes surfaces lithologiques identifiées sur l'image. Il est apporté également par des entités linéaires repérables dans une surface autrement homogène ou des phénomènes traversant visiblement plusieurs types de surface. Cet aspect vise à obtenir de l'information sur les structures organisant les entités lithologiques, c'est-à-dire l'information structurale. Dans une étude utilisant les images satellitaires, on peut donc caractériser l'organisation des structures géologiques directement, à partir des linéaments, et sans considérer les lithologies comme point de départ. Les linéaments sont reconnus comme importants dans la compréhension des structures et du tectonisme d'une région (Joshi, 1989). C'est ici que la notion de linéament doit être précisée car c'est le rehaussement et l'extraction de ceux-ci qui permettra de caractériser les structures géologiques. Il importe également de limiter le sens du mot dans le cadre du présent ouvrage.

2.2. Définition

Du latin linea = ligne et mentum = semblable à

Définir le linéament n'est pas si simple que cela. Les travaux publiés en donnent une variété de définitions qui va de la plus simple à la plus formelle et élaborée. La meilleure selon nous est simple et présente une connotation géographique : « lignes significatives du paysage révélant l'architecture cachée du sous-sol rocheux. » (Hobbs, 1912 *in* O'Leary *et al.*, 1976) (traduction libre). On comprend ici que le terme signifie linéament géologique porteur d'une information sur les structures. Cette autre définition s'applique parfaitement dans le présent ouvrage : « a natural linear feature consisting of topographic (including straight stream segments), vegetation, or soil tonal alignments, visible primarily on aerial photographs or mosaics, and expressed continuously or discontinuously for many miles. » (Lattman, 1958 *in* O'Leary *et al.*, 1976). Elle ne mentionne pas cependant que les linéaments reflètent des phénomènes s'enfonçant plusieurs centaines et même plusieurs milliers de mètres sous la surface. Dans le présent ouvrage on considère les linéaments comme des entités unidimensionnelles ayant une longueur et une orientation et dont la population sur l'image présentent une densité, un agencement, un espacement et une répartition caractéristique.

2.3. Origine des linéaments

Il peut exister plusieurs causes naturelles à l'origine d'un linéament : ligne de crêtes topographiques, contact entre formations de lithologies différentes, ligne de fracture ou de faille, etc. Ils peuvent être identifiés visuellement par leur effet sur le paysage. On peut citer, entre autres, un changement ou une anomalie dans le couvert végétal, la géométrie des rives d'un plan d'eau, la forme du réseau de drainage ou des coudes inexplicables dans les cours d'eau principaux. On peut repérer les linéaments dans l'image en cherchant les frontières linéaires entre deux zones de brillance différente ou de texture différente. On peut aussi chercher les ombres linéaires ou les inclusions linéaires (Nguyen and Ho, 1988; Fraipont et Hirsch, 1984).

Les linéaments peuvent aussi avoir des causes d'origine humaine comme les limites de cultures, les routes et autres constructions. Dans ce cas, ils ne sont pas, en principe, liés à la géologie mais ils peuvent l'être dans certains cas. Cependant, si l'on considère l'ensemble des travaux publiés, on constate que les structures géologiques contrôlent tellement la morphologie de la surface terrestre que, dans presque tous les cas, les linéaments extraits d'une image satellitaire caractérisent ces structures à un très fort degré (Scanvik, 1987).

2.4. Travaux antérieurs

La revue et l'appréciation objective des travaux publiés sur le sujet sont une étape préliminaire importante. Cette revue influence de façon bénéfique l'établissement de la méthodologie la mieux adaptée pour notre projet. Un premier point important à faire ressortir est la problématique du repérage des linéaments. Le deuxième point consiste à obtenir une vue d'ensemble des différentes méthodes proposées par les chercheurs. Le lien entre ces deux points est très étroit.

2.4.1. Problématique du repérage des linéaments

Joshi (1989) affirme que la reconnaissance de linéaments sur une photo aérienne ou une image satellitaire est quelque chose de subjectif et qu'elle peut varier selon l'interprète. Le repérage des linéaments dépend de la perception visuelle et de l'habileté à reconnaître des patrons dans l'image. Il en déduit que l'expérience d'un individu et ses connaissances de la zone étudiée sont des facteurs clés dans l'identification des linéaments.

Offield (1975) mentionne une caractéristique visuelle des linéaments géologiques qui pose un problème lors du traçage. En effet, la plupart de ceux-ci se présentent sous forme de lignes discontinues, comme des pointillés ou des tirets irréguliers. À ce titre,

il propose d'augmenter la visibilité des linéaments par un moyen optique, en observant une photo aérienne à travers un réseau de diffraction. L'appareil, très simple, permet de rendre les lignes discontinues beaucoup plus continues à l'œil. Un plus grand nombre de linéaments sont ainsi détectés et tracés sur la photo. Ce traçage manuel, mais fastidieux, est un moyen simple d'obtenir une carte des linéaments conforme à la réalité du terrain. Il ne semble pas exister de version numérique de ce dispositif optique. Voilà peut être une voie vers la création d'un nouvel algorithme de traitement d'image.

L'usage de méthodes d'extraction et de traçage informatisées apparaît comme un moyen de pallier aux faiblesses de l'interprétation humaine. Un algorithme présente l'avantage de traiter rapidement l'image de façon objective et systématique. On ne peut pas cependant proclamer de solution miracle. Combler les discontinuités entre les bouts de linéaments de façon sensée complique passablement le design d'un algorithme de traçage automatique des linéaments. Celui proposé par Wang et Howarth (1990) est une solution remarquable sur ce point.

Un repérage objectif et complet des linéaments d'une région nécessite de tenir compte des particularités de cette région. Ces particularités doivent être considérées au moment de préciser la méthodologie du projet. La région à l'étude, un secteur de la Beauce décrit en détail au chapitre 3, présente un caractère rural. On y trouve une mosaïque faite de forêts et de champs de cultures. Le couvert végétal y est dense mais varié, avec feuillus et conifères. La zone d'étude est donc très différente des régions plus nordiques souvent ciblées par ce genre de recherche minière. On trouvera possiblement sur l'image satellitaire un plus grand nombre de linéaments artificiels, ayant une origine humaine. Les méthodes d'extraction automatique des linéaments seront alors plus difficiles à utiliser avec succès.

2.4.2. Méthodes proposées

Le nombre de filtres, de traitements mathématiques et de types d'images satellitaires disponibles permet un grand nombre de méthodes. Il peut y avoir en plus plusieurs variantes d'une même méthode de rehaussement et de traçage de linéaments. Présenter toutes les méthodes publiées serait très long. On peut simplifier leur revue en divisant les traitements numériques orientés vers les linéaments en deux catégories générales.

La première regroupe les rehaussements facilitant l'interprétation humaine. Les différents filtres numériques en sont un exemple typique. On peut mentionner les filtres Laplacien et les filtres Sobel. Leurs avantages et leurs faiblesses sont expliqués en détail par Russ (1995). La plupart des logiciels de traitement d'image incorporent ce genre de traitement. Le rehaussement peut aussi se faire dans le domaine fréquentiel, sur un spectre de Fourier, avec possibilité d'utiliser des filtres de conception nouvelle (Niño *et al.*, 1993).

La deuxième catégorie de traitements vise à extraire et tracer de façon automatique les linéaments à partir de l'image directement ou dans une image des gradients ou dans une image *binarisée*. L'opération est plus complexe et, par conséquent, les programmes capables de l'exécuter avec succès sont peu nombreux. Un programme, intéressant par son approche sans filtres et par son utilisation de la transformée de Hough, est publié par Raghavan *et al.* (1995). L'algorithme utilisé contourne les problèmes rencontrés par les filtres numériques dans les zones peu contrastées ou ombrées de l'image. Un système informatique complet a même été proposé. Il peut tracer aussi bien les routes que les linéaments géologiques (Wang, 1993).

En général, les travaux publiés proposent différentes procédures par étapes conduisant au traçage des linéaments (Chatterjee *et al.*, 1996; Lord *et al.*, 1996; Arlegui and Soriano, 1998; Budkewitsch *et al.*, 1994; Moore and Waltz, 1983; Mah *et al.*, 1995; Babu Madhavan *et al.*, 1997). Ces procédures impliquent généralement la détection et le rehaussement des contours ou des gradients suivis par un filtrage comme

moyen de classer l'image en pixels indiquant la présence d'un linéament et en pixels indiquant l'absence de linéament. Le terme anglais pour nommer cette classification est *binarisation*. Quelques travaux portent plus spécifiquement sur les méthodes d'analyse des cartes de linéaments (Mostafa and Zakir, 1996; Karpuz et al., 1993)

2.5. Objectifs

L'objectif principal du projet est d'apporter une information sur les structures géologiques qui soit complémentaire aux connaissances géoscientifiques présentes sur le territoire étudié.

Cette information nouvelle justifie le projet et elle concrétise l'apport fourni par le moyen de la télédétection. L'atteinte de cet objectif démontrera, une fois de plus, l'utilité des images de télédétection dans l'étude de la croûte terrestre. Il démontrera, plus spécifiquement, la pertinence d'utiliser ces images dans des terrains dont on connaît déjà plus ou moins complètement les structures et la lithologie.

Le cheminement vers ce but devrait permettre d'atteindre trois objectifs secondaires :

Le premier est de faire valoir que l'intégration de données multisources de télédétection et de géologie permet d'approfondir l'information sur les structures et les gîtes aurifères. Un outil informatique pouvant faciliter cette intégration existe, c'est le système d'information géographique ou SIG. La mise sur pied d'un tel système est réalisée dans le cadre de cette recherche. Il rend plus aisées les opérations cartographiques et la manipulation des données.

Le deuxième objectif secondaire consiste à évaluer les données RSO en bande C de RADARSAT-1 et comparer l'information qu'elles apportent par rapport au capteur TM de Landsat 5.

Le troisième de ces objectifs est de mettre au point un outil de recherche applicable à l'exploration minière, en mettant l'accent sur la localisation des gîtes aurifères.

2.6. Hypothèses

La réalisation des objectifs mentionnés dépend de la validité des hypothèses suivantes :

Première hypothèse : Les linéaments extraits d'une image satellitaire contiennent principalement une information sur les structures géologiques de la zone observée. En effet, dans l'ensemble des linéaments détectés et cartographiés, on peut éliminer ceux qui sont visiblement le fait d'activités humaines. Ceux qui restent ne peuvent être départagés en fonction de leur origine. S'ils ne sont pas majoritairement liés à la géologie, l'information sur les structures devient très difficile à extraire. On peut juger cette hypothèse comme étant la plus importante.

Deuxième hypothèse : Les différents capteurs, RSO et TM, fournissent une information complémentaire qui justifie l'utilisation de données multisources.

Troisième hypothèse : La métallogénie a été influencée ou contrôlée par les structures. Cette troisième hypothèse est une condition essentielle à la possibilité d'utiliser les linéaments dans un processus de localisation de cibles potentielles pour l'exploration minière.

3. Région d'étude

La zone d'étude est située dans les Appalaches du Québec. La figure 1 la localise dans l'ensemble du Québec. Aux fins de l'étude elle est limitée entre 46° et 46° 45' de latitude nord et 70° et 71° de longitude ouest. Quatre cartes topographiques, à l'échelle de 1:50 000, sont requises pour couvrir la zone. Ces quatre cartes sont publiées par Énergie, Mines et Ressources Canada sous les références suivantes :

- Beauceville 21 L/2 1993,
- Saint-Joseph-de-Beauce 21 L/7 1993,
- Sainte-Justine 21 L/8 1994,
- Saint-Magloire 21 L/9 1993,

Les deux cartes couvrant la moitié à l'est sont utilisées en partie seulement parce que la portion située aux États-Unis n'est pas couverte. La superficie réelle couverte est d'un peu plus de 4 000 km². La figure 2 illustre avec plus de détails et montre quelques items décrits plus loin.

3.1. Critères de sélection

Cette zone d'étude a été choisie en fonction de plusieurs raisons. Un des critères de sélection est l'existence dans la zone d'un potentiel minéral, en l'occurrence l'or, qui a fait l'objet de recherche et d'exploration à certaines périodes (LaSalle, 1992; Gauthier *et al.*, 1989) Même s'il n'y a jamais eu de mines en tant que telles, une quantité appréciable d'or a été extrait des dépôts alluviaux de certaines rivières pendant la période s'étendant de 1834 à 1979. Ces dépôts aurifères sont appelés placers. Les détails de ce genre d'exploitation et l'historique sont compilés dans le rapport publié par LaSalle (1992).

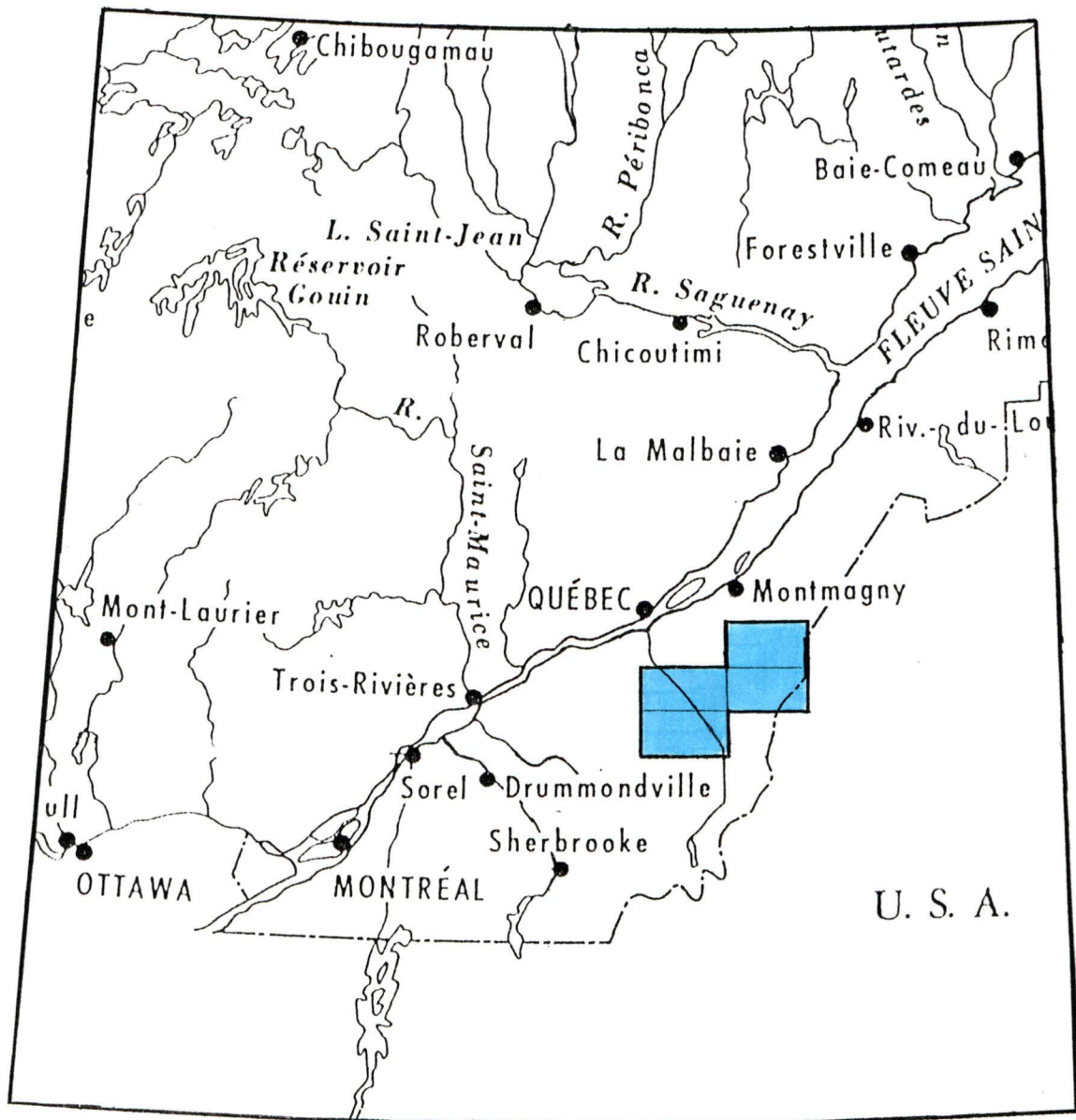


Figure 1 – La région d'étude, un secteur de la Beauce, Québec

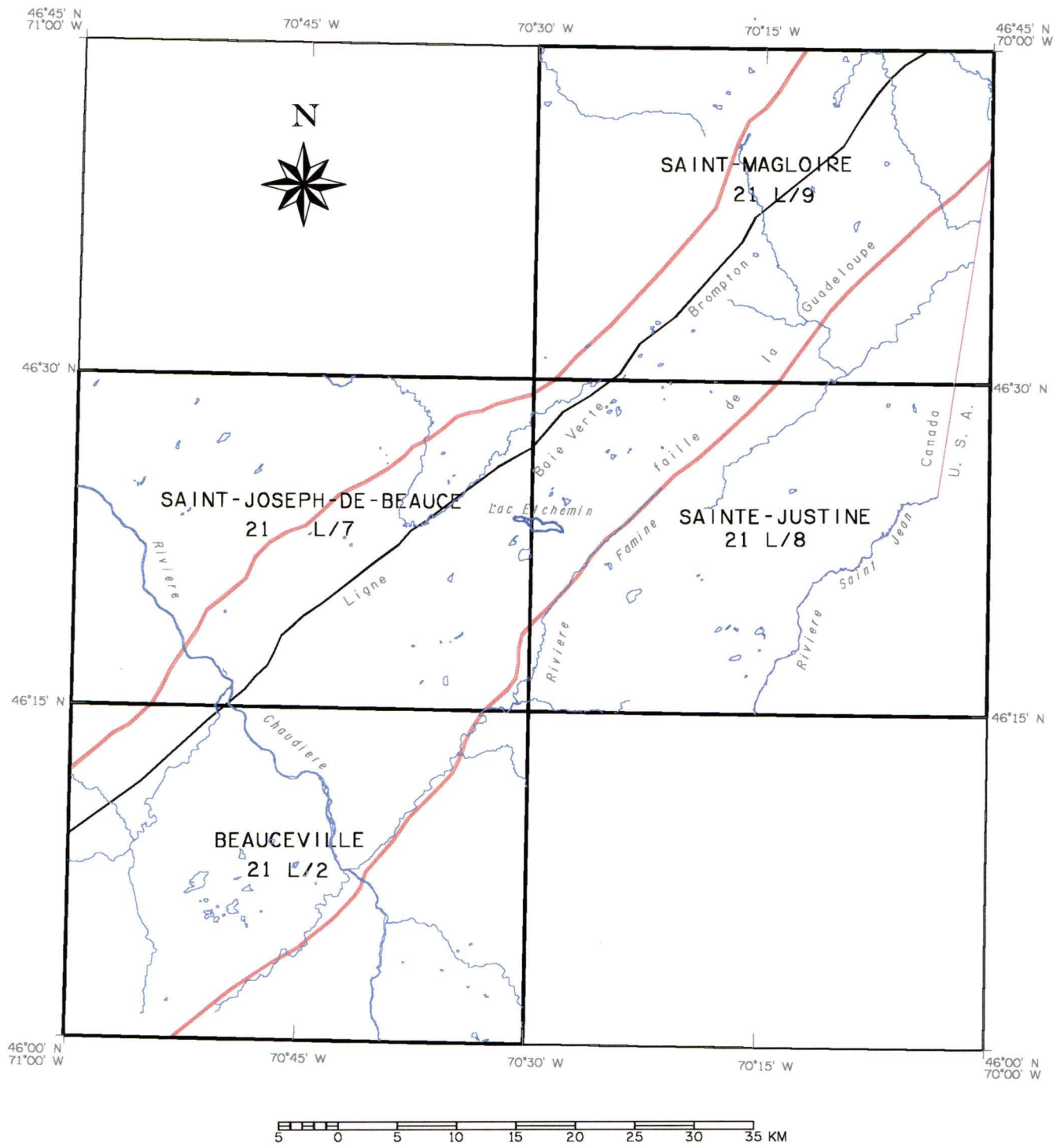


Figure 2 – Les quatre cartes couvrant la région d'étude

L'effort fait pour identifier la source de cet or a été sporadique et, dans l'ensemble, peu important. L'exploration minière a toujours été beaucoup plus intense dans les régions de l'Abitibi et du Grand Nord. Il peut y avoir plusieurs raisons à ce fait mais la plus évidente est d'ordre légal. En effet, dans de larges secteurs des Cantons de l'Est, une pratique datant du régime français donnait au propriétaire des terrains en surface les droits miniers du sous-sol. C'était le cas dans le territoire de l'ancienne Seigneurie Saint-François, qui recouvre le secteur à l'étude. L'effort d'exploration, avant 1982, était donc freiné par le peu de volonté des fermiers de céder leurs droits.

La Loi 59 du 23 juin 1982 a remis dans le domaine public les droits miniers et a permis une revitalisation de l'exploration. Le gouvernement du Québec favorisa cette tendance, notamment par la publication d'une synthèse géologique réalisée par Gauthier *et al.* (1989). Une étude du potentiel de la région, réalisée par Burzynski (1993), renseigne sur les zones les plus intéressantes, sur les travaux effectués et sur certains aspects économiques. On y apprend que de vastes zones de terrain hautement prometteur n'ont pas fait l'objet d'explorations récentes. L'endroit suscite actuellement l'intérêt de quelques compagnies d'exploration, en particulier Mines d'Or Virginia (1997) qui a contribué financièrement à cette étude par télédétection.

Le choix des limites de la région d'étude s'est aussi fait en tenant compte de travaux de cartographie géologique en voie de réalisation par le Gouvernement du Québec, Bureau des Mines, et de suggestions de la part de personnes bien informées sur cette région (Marquis, 1997). La présente recherche semblait apte à fournir une information supplémentaire utile à ces travaux. Les images TM et RSO ont été obtenues du Bureau des Mines, selon un arrangement qui démontre une attitude positive et une volonté d'aider la recherche universitaire de la part de ce Ministère.

3.2. Topographie

Rappelons que le relief appalachien est une forme classique de pénéplaine caractérisée par des formes douces et des vallées évasées (Foucault et Raoult, 1992). Les massifs et les vallées y ont des formes allongées et parallèles. Cette forme est le résultat d'une longue érosion dans une région de vieilles montagnes plissées. Le paysage a plus de relief dans la partie nord de la zone d'étude à cause de la présence des monts Notre-Dame. Le relief varie d'environ 150 m dans la vallée de la Chaudière, qui couvre la partie sud, à 400 ou 500 m dans la partie nord. Quelques sommets dépassent 700 m. Cette région présente un caractère rural. La plus grande densité de population se trouve au sud. Les principales agglomérations sont situées le long de la rivière Chaudière. On peut mentionner par ordre d'importance celles de Saint-Georges, Saint-Joseph, Beauceville et Linière.

On remarque que le paysage est une mosaïque de terres cultivées et de forêts mixtes. La proportion des terres cultivées diminue si on se déplace vers le nord. En forêt, l'association végétale caractéristique est l'érablière à bouleau jaune (Cousineau, 1986). La forme de division cadastrale selon le modèle de l'ancien régime français est omniprésente. Ceci fait que les terres cultivées y sont longues et étroites et génèrent un patron facilement repérable sur une image satellitaire.

3.3. Hydrographie

Trois bassins hydrographiques principaux se partagent l'ensemble de la région d'étude. Le principal bassin hydrographique est celui de la rivière Chaudière et il occupe la portion sud-ouest de la zone. La rivière Chaudière s'écoule en général du sud-est vers le nord-ouest, vers le Saint-Laurent. Quelques affluents sont d'importance, ce qui revient à dire qu'ils sont très visibles sur les images TM et RSO. On peut mentionner les rivières Famine, du Loup, du Bras Saint-Victor. Plus vers le nord-est, les monts Notre-Dame séparent les rivières s'écoulant vers le Saint-Laurent, et dont la plus importante est la rivière Etchemin, d'une rivière s'écoulant vers l'Atlantique, la rivière Daaquam. La rivière

Saint-Jean marque la limite sud-est de l'ensemble du territoire étudié et est également une frontière internationale.

Il y a dans ce territoire relativement peu de lacs, si on compare avec les Laurentides. On remarque surtout le lac Etchemin qui se situe en plein centre de la région. Au sud, un groupe de petits lacs est situé à une dizaine de kilomètres de Saint-Georges-de-Beauce. On remarque peu de lacs importants au nord sauf le lac Frontière, situé à la limite nord de la zone.

3.4. Géologie

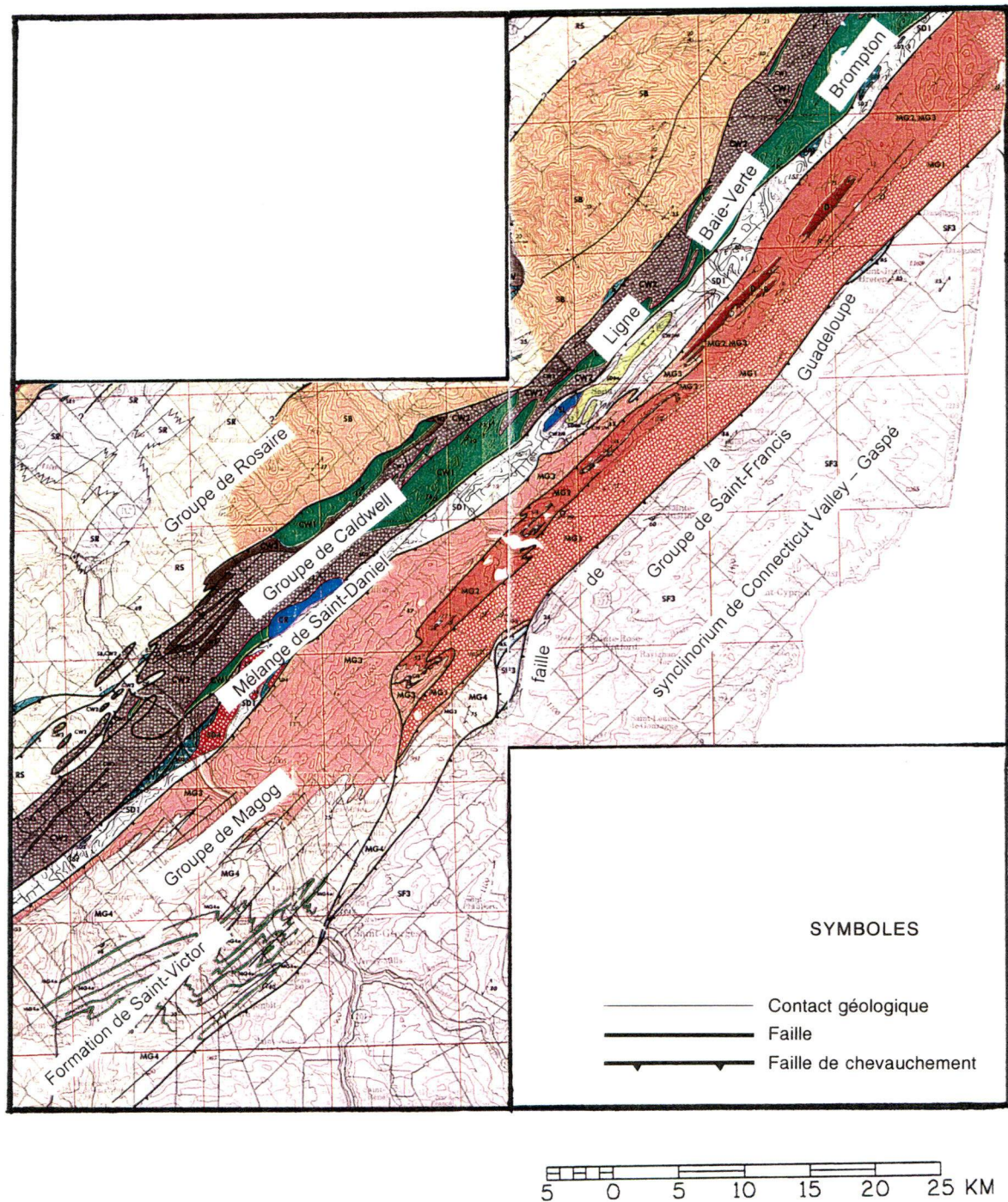
Si la description du paysage permet d'appréhender les problèmes posés lors du traitement des images satellitaires, une description de la géologie devient nécessaire pour la compréhension de l'interprétation qui sera faite de la carte des linéaments. Malgré une superficie réduite la région d'étude est relativement compliquée du point de vue structural et une cartographie géologique détaillée n'est disponible que pour une partie seulement de cette surface. Il faut cependant se limiter ici à présenter une vue générale. Une carte géologique simplifiée aide à mieux saisir les descriptions qui suivent (figure 3).

3.4.1. Structures géologiques

La zone d'étude fait partie de la Province géologique des Appalaches, c'est donc dire que les roches ont été plissées et déplacées à leur endroit actuel par deux orogénèses successives. L'orogène Taconique (~480 Ma à ~440 Ma) est responsable de la formation des monts Notre-Dame. L'orogène Acadienne (~400 Ma à ~360 Ma) marque la phase finale de la fermeture du paléo-océan lapétus.

Trois domaines stratigraphiques sont présents dans l'ensemble du terrain et ils sont séparés par deux failles de chevauchement importantes. Ces failles sont la ligne Baie-Verte – Brompton au nord-ouest et la faille de La Guadeloupe au sud-est. Au nord-ouest, on trouve le domaine des nappes internes. Ce domaine appartient à la Zone de Humber. Au centre c'est le domaine océanique selon St-Julien et Slivitsky (1987). Il est au cœur de notre zone d'étude. Ce domaine fait partie de la Zone de Dunnage selon Williams (1979) et est d'âge Ordovicien. Au sud-est, on trouve des séquences plus jeune, d'âge Dévonien supposé, qui forment le synclinorium de Connecticut Valley – Gaspé. Celui-ci est affecté seulement par l'orogénèse acadienne et repose en discordance sur les roches du domaine océanique.

Les limites de la région ayant un potentiel aurifère s'établissent de façon naturelle entre la faille de La Guadeloupe au sud-est et le Groupe de Caldwell au nord-ouest. Cette faille et le Groupe de Caldwell délimitent une bande mesurant de 15 à 25 km de largeur par 110 km de longueur et orientée sud-ouest nord-est. Ces limites sont indiquées en rouge sur la figure 2.



Inspiré de St-Julien et Slivitzky (1987)

Figure 3 – Carte géologique de la région d'étude

3.4.2. Lithologie

On dénombre trente-trois formations lithologiques différentes dans les rapports géologiques publiés par Cousineau (1990,1987,1986,1984). Le domaine océanique est bien couvert mais les domaines adjacents le sont de façon plus sommaire.

De l'ouest vers l'est, les lithologies vont du plus vieux vers le plus jeune. Elles sont séparées, généralement, par des failles de chevauchement,. Dans le domaine des nappes internes se trouve le Groupe de Caldwell, d'âge Cambrien, composé de schistes, de pélites, d'ardoises, de grès feldspathiques et de volcanites mafiques. On trouve ensuite des portions du plancher océanique (mélange ophiolitique) sous forme de grès, gabbros et serpentinites plus métamorphisés que les roches environnantes. Celui-ci regroupe des assemblages lithologiques déposés sur une croûte océanique et des portions de cette croûte océanique (des ophiolites).

Le long de la ligne Baie-Verte – Brompton on trouve une série d'argilites faisant partie du Mélange de Saint-Daniel, tout comme le mélange ophiolitique. Ces roches sont considérées comme étant les reliquats d'un prisme d'accrétion. Vers l'est, le Groupe de Magog occupe la plus grande partie du domaine océanique jusqu'à la faille de La Guadeloupe. On peut y identifier quatre formations. Les trois formations situées au nord sont composées de grès, mudslate, mudrocks et clayslate avec un peu de volcanoclastites. La quatrième, la Formation de Saint-Victor, située vers le sud, est composée d'une séquence de turbidites où la lithologie dominante est l'argilite silteuse. Des strates de tufs felsiques y sont intercalées et marquent le relief du paysage. Les contacts lithologiques y sont donc visibles sur les images TM et, en partie, sur l'image RSO.

À l'est de la faille de La Guadeloupe, on trouve les terrains d'âge Dévonien de la Formation de Famine et d'autres unités non différenciées appartenant au Groupe de Saint-Francis. On y retrouve à la fois des roches terrigènes et des roches carbonatées. Ce sont des conglomérats, des grès, des argilites, et des calcilutites. Ce

secteur est un des moins connus de l'ensemble, puisque même l'âge Dévonien (~400 M.a.) attribué est contesté par certains.

Enfin, il est intéressant de mentionner que les minéralisations en métaux et en or ont comme source probable les roches d'origine volcanique. Lors des orogénèses, l'activité hydrothermale a permis la mobilisation et la concentration de ces minéraux dans les roches compétentes. Une hypothèse courante est que les placers auraient comme origine l'érosion de ces roches et la concentration par l'action des cours d'eau (LaSalle, 1992). Il convient ici de revenir sur l'hypothèse selon laquelle la métallogénie a été influencée par les structures (section 2.7) et de commenter brièvement. Il existe plusieurs processus de formation des gisements minéraux. L'étude de cette branche de la géologie est largement approfondie dans les traités de métallogénie. Dans le cas du territoire étudié ici et pour les substances recherchées, on peut résumer le contenu des différents travaux et rapports géologiques disponibles de la façon suivante.

Une activité hydrothermale s'est exercée au moment de la diagenèse et lors de la formation des Appalaches. L'activité hydrothermale provoque une transformation dans les assemblages minéralogiques. Il y a mobilisation et transport, par la circulation hydrothermale, de certains minéraux qui se mettent en place ensuite à des endroits privilégiés. Ces endroits sont déterminés par les propriétés physico-chimiques des minéraux et par les structures présentes. Ces structures peuvent agir comme voie de transport aussi bien que comme lieu de piégeage. Elles jouent donc un rôle important dans la concentration d'un minéral donné et dans la localisation finale d'un gisement.

On peut donc admettre que si les linéaments visibles sur une image satellitaire apportent une information sur les structures, ces mêmes linéaments peuvent aussi être impliqués dans la localisation de gisements minéraux. On comprend alors l'importance d'obtenir une carte des linéaments qui soit la plus véridique possible. La méthodologie suivie doit viser à ne conserver que les linéaments ayant une origine géologique tout en restant objectif et systématique dans ce choix.

4. Matériel et méthodes

Le présent chapitre précise en premier les particularités des images utilisées. Le traitement d'image et la méthodologie utilisée pour obtenir la carte des linéaments sont ensuite détaillés.

4.1. Les images utilisées

4.1.1. Image RSO de RADARSAT-1

Le satellite canadien RADARSAT-1 véhicule un des plus récents capteurs actifs du type RSO (Radar à synthèse d'ouverture). Une des caractéristiques de ce capteur en bande C (5,3 GHz) est la présence de plusieurs modes d'acquisition des images. Ces modes se distinguent, entre autres, par la résolution et la largeur de la trace au sol. L'image utilisée ici est acquise selon le mode à faisceaux larges. Elle possède donc une limite de résolution de 35 m par 28 m et elle couvre une superficie plus grande grâce à une largeur de trace au sol de 150 km. Rappelons que la résolution est une mesure de la plus petite forme pouvant être distinguée sur l'image et qu'elle est beaucoup plus importante que la taille du pixel. Elle est fixe pour un mode d'acquisition donné alors que la taille du pixel peut varier selon le traitement de l'image. Il faut noter ici que l'image disponible ne couvre que partiellement la zone d'étude, seul le feuillet Beauceville 21 L/2 est couvert. Le reste de l'image couvrirait une vaste zone située au sud de la région d'étude. Le tableau 1 donne les principales caractéristiques de l'image RSO.

Tableau 1 – Caractéristiques de l'image RSO

Date	6 juin 1996
Heure	10:56:19 GMT
Faisceaux	large 2 (wide 2)
Orbite	descendante
Dimension	11 744 lignes, 12 804 pixels
Taille du pixel	12,5 m
Résolution	35 m par 28 m
Angle d'incidence	31° à 39°
Nombre de visées	4

4.1.2. Image TM de Landsat 5

La seconde image provient du capteur TM (Thematic Mapper) du satellite Landsat 5. Ce capteur transmet une image multispectrale de sept bandes allant du bleu (TM1) à l'infrarouge thermique (TM6). L'image fournie ne comportait cependant que les bandes TM3, TM4 et TM5. Les bandes TM4 (Infrarouge proche) et TM5 (Infrarouge moyen) furent utilisées pour obtenir une image destinée au repérage des linéaments. La bande TM3 (rouge) fut très utile pour localiser les routes et les autres éléments servant de points de repère pour la correction géométrique. Quatre images couvrant chacune une des cartes au 1:50 000 furent découpées de l'image originale. Une marge d'environ dix pour cent permet une superposition des images.

Il faut signaler ici que la bande TM7 n'était pas disponible. Cette bande est cependant importante dans les applications à caractères géologiques. Elle permet de différencier les formations rocheuses et elle a été démontré très efficace pour l'identification des zones d'altération hydrothermales dans les massifs rocheux (Jensen, 1996).

La bande TM3 caractérise l'absorption de la chlorophylle présente dans la végétation en santé. Elle peut donc être utile pour délimiter les contacts entre différentes formations pédologiques et géologiques. La bande TM4 est très sensible à la quantité de biomasse végétale présente. Elle permet l'identification des cultures et met l'accent

sur les contrastes entre le sol et les cultures et entre l'eau et la terre. La bande TM5 est très sensible à la turgidité, ce qui signifie la quantité d'eau dans la plante. Le tableau 2 donne les caractéristiques de l'image TM.

La portion d'image couvrant la zone d'étude était, malheureusement, traversée dans sa partie centrale par une traînée de nuages de haute altitude. Cette traînée de vapeur d'eau, plus ou moins transparente, modifiait à la baisse les valeurs radiométriques normales et ceci de façon inégale d'un endroit à l'autre. Ceci limitait les possibilités de traitement. Entre autres, les classifications et les composés fausses couleurs n'ont pu être utilisées. Les bandes infrarouges étant moins affectées par la vapeur d'eau, les deux bandes TM4 et TM5 furent conservées pour la suite du traitement. Le traitement d'image s'est effectué de façon à minimiser l'impact de ce problème sur la visibilité des linéaments.

Tableau 2 – Caractéristiques de l'image TM

Date	14 juin 1991
Bandes spectrales	TM3, TM4, TM5
Dimension	9 000 lignes, 10 000 pixels
Taille de pixel	25 m
Élévation du soleil	58°
Azimut du soleil	129°
Traitement initial	Géorérencée selon une projection UTM, zone 19, Ellipsoïde de référence NAD de 1927

4.2. Méthodologie

L'organigramme de la figure 4 illustre la présente description de la méthodologie.

4.2.1. Recherche bibliographique

Cette étape consiste à faire l'inventaire des articles et thèses ayant pour sujet l'étude des structures géologiques par le moyen de la télédétection et de l'analyse des linéaments. Plus de 70 articles ont été retenus. L'examen de ces articles a permis de mieux comprendre la problématique de l'extraction des linéaments géologiques. Il a aussi permis d'accumuler la matière nécessaire à la rédaction du chapitre 2, surtout les section 2.1.1. à 2.4. inclusivement. On a pu constater la grande variété, et parfois originalité, des méthodes de rehaussement et d'extraction des linéaments contenus dans une image. Un jugement objectif des résultats avancés par les différents auteurs permet de considérer que toutes les méthodes sont valables. Il faut utiliser celle qui semble la plus adaptée à l'objectif visé et aussi la plus adaptée aux caractéristiques particulières de la région à l'étude.

4.2.2. Compilation géologique

L'opération consiste à faire l'inventaire des connaissances géologiques disponibles sur la région d'étude à partir des rapports géologiques, des études et des cartes publiées. Les relevés et indices à teneur élevée découverts lors des campagnes d'échantillonnage sont très utiles pour valider les résultats de l'aspect prospection de ce projet. Les placers anciennement exploités méritent également d'être considérés.

Les données géologiques et les autres données de nature cartographique sont introduites dans un système d'information géographique dont le principal logiciel utilisé est PAMAP/GIS. On peut donc considérer ce SIG comme étant un système d'information géoscientifique.

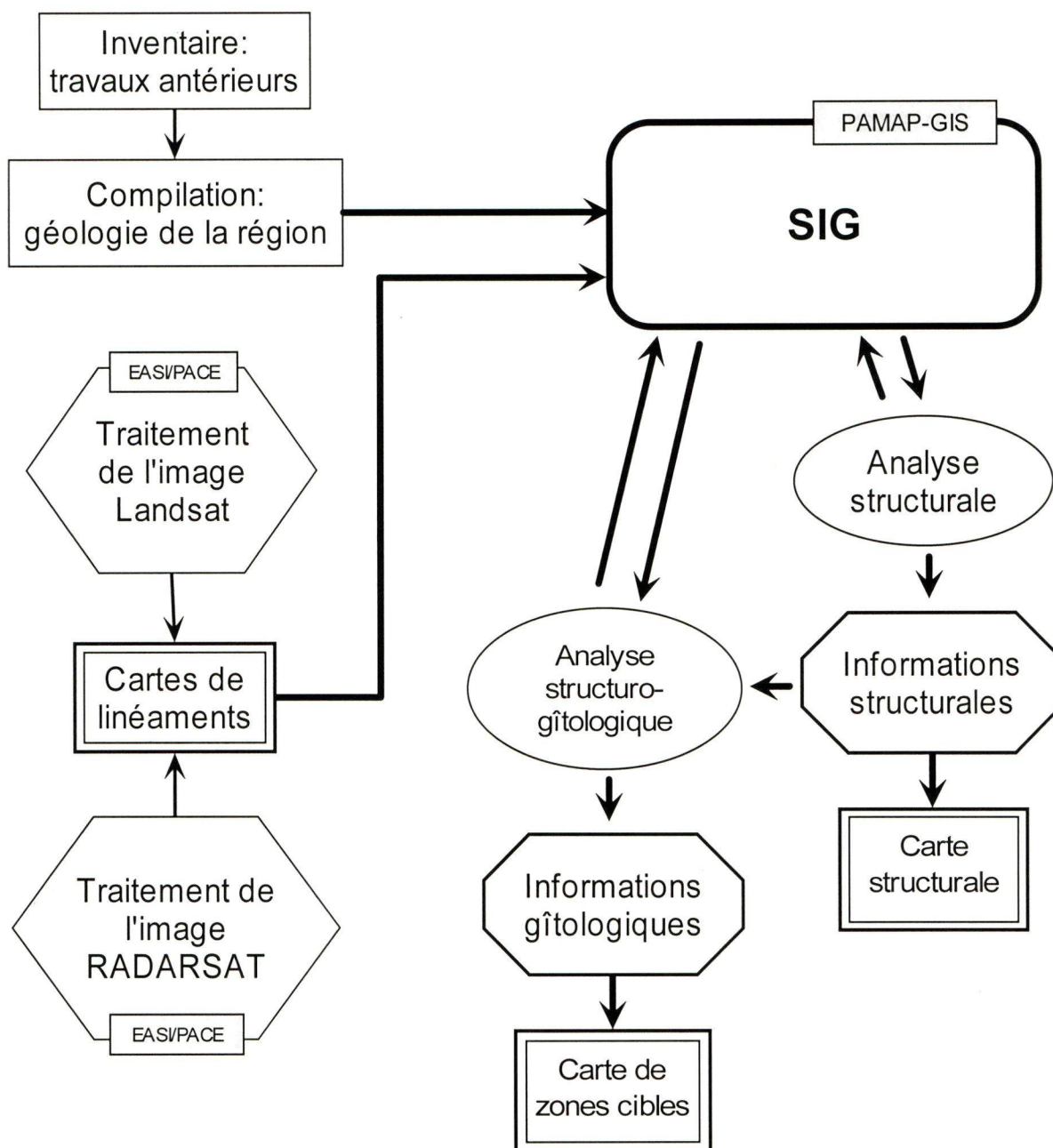


Figure 4 – Organigramme de la méthodologie

4.2.3. Système d'information géoscientifique

Ce projet nécessite pour sa réalisation l'usage de plusieurs logiciels qu'on peut regrouper dans un ensemble qui est en fait un système d'information géoscientifique. C'est le SIG illustré à la figure 4 (Organigramme de la méthodologie). Le tableau 3 en détaille les éléments.

Tableau 3 – Composantes du SIG

Logiciel	Usage
EASI/PACE	Traitement des images satellitaires
PAMAP/GIS	Cartographie et base de données
IDRISI	Calcul de la surface de tendance
AUTOCAD	Rosaces directionnelles
EXCEL	Statistiques, histogrammes, manipulation de données
ACCESS	Formatage de données pour importation ou exportation

4.2.3.A. Concepts

Il faut rappeler ici qu'un système d'information géographique est beaucoup plus qu'un outil de cartographie informatisé. Sa caractéristique essentielle est d'intégrer une base de données à caractère spatial et de pouvoir répondre à des questions (et, idéalement, fournir des solutions) par le biais d'opérations logiques programmables par l'utilisateur moyen. Les concepts régissant l'art de mettre sur pied un tel système sont traités en profondeur par Laurini et Thompson (1992). Un exemple original de SIG appliqué à la géologie est donné par le projet de système en trois dimensions de l'université de Bonn, en Allemagne (Bode *et al.*, 1994). Les problèmes liés à l'intégration de la télédétection et des SIG sont bien exposés dans un article de Wilkinson (1996).

4.2.3.B. Mise en œuvre des concepts

Le logiciel PAMAP/GIS version 4.2 pour Windows est le principal élément du SIG. C'est un outil informatique très utile pour plusieurs raisons. Il permet de visualiser, de manipuler, de confronter et de fusionner les données cartographiques. C'est le côté arithmétique de cartes de ce type de logiciel. Il permet de produire sur papier les résultats d'analyse ou de manipulation sous forme de cartes ou de tableaux. Il offre la possibilité d'intégrer des données vectorielles, comme la carte topographique, ou des données matricielles comme l'image TM. La base de données intégrée dans le logiciel permet d'inclure les données de nature non cartographique et d'en permettre l'exportation ou l'importation vers d'autres logiciels comme Excel ou Access.

L'étape initiale consiste à numériser les cartes topographiques et les données géologiques. Quatre cartes au 1:50 000 sont générées à cette étape. Elles sont ensuite fusionnées en une seule carte générale couvrant toute la zone d'étude. Cette carte générale est utilisée pour les analyses et aussi pour l'impression des résultats sous forme de cartes.

4.2.3.C. Traitement d'image

Le traitement d'image est effectué avec le logiciel EASI/PACE version 6 de PCI Geomatics Inc.. Les modules ImageWorks et GCPWorks sont activement utilisés.

4.2.3.D. Traitement de la carte des linéaments

Le logiciel PAMAP/GIS est au centre de toutes les manipulations visant à analyser les données géospatiales. La carte des linéaments est inscrite dans une des couches vectorielles du SIG. Certaines opérations nécessitent l'usage d'autres logiciels. Le

logiciel IDRISI fut utilisé pour le calcul de la surface de tendance et AUTOCAD version 10 a servi pour le traçage des rosaces directionnelles. Les fonctions Importer et Exporter de ces logiciels étant souvent déficientes, l'importation et l'exportation des données utilisent, lorsque c'est nécessaire, la base de données ACCESS ou le tableur EXCEL comme intermédiaire.

4.3. Traitement de l'image RSO

L'image disponible a été découpée pour ne conserver qu'une portion de 3 744 pixels par 2 400 lignes comme image de base. Une sous-image de 1 024 par 768 pixels, située à l'ouest de Saint-Georges et contenant quelques petits lacs, est utilisée pour les différents tests de filtres. Les calculs sont plus rapides et les comparaisons entre les images résultantes plus faciles. La figure 5 montre l'organigramme du traitement de l'image RSO.

4.3.1. Filtrage

Dans le but de réduire le chatoiement et le bruit inhérent aux images RSO une série d'essais furent effectués pour préciser le filtrage initial. De nombreux filtres sont disponibles dans les modules d'EASI/PACE et il est aussi possible de programmer un filtre sur mesure. Une étude comparative publiée renseigne sur les qualités des différents filtres (Shi and Fung, 1994). Le meilleur résultat est obtenu par l'application d'un filtre Frost de 7×7 pixels avec facteur d'amortissement de 3 (DAMP=3).

Ensuite, un filtre médian de 3×3 pixels est appliqué sur l'image. Le but est de lisser et homogénéiser l'image, tout en préservant les contours. On obtient par la suite une meilleure visibilité des linéaments (Wang and Howarth, 1990). Le filtre médian est préférable au filtre moyen dans ce cas (Deslandes et Gwyn, 1991). Les détails de

l'image sont alors moins bruités et mieux définis malgré une légère perte de résolution. L'image est alors prête pour la correction géométrique.

4.3.2. Correction géométrique

On vise ici à corriger les distorsions résiduelles de l'image et à la caler avec précision sur le fond topographique correspondant. L'image est donc ajustée au même type de projection cartographique que la carte Beauceville, c'est-à-dire UTM zone 19. L'identification sur l'image et sur la carte topographique d'environ 50 points de contrôle est la première étape. Les croisements de route et certains bâtiments isolés agissant comme réflecteur spéculaire sont particulièrement utiles comme points de contrôle.

Le module GCPWorks permet une élimination successive des points qui augmentent l'erreur moyenne de positionnement. Cette erreur se mesure par un échantillonnage statistique et s'exprime en nombre de pixels d'écart. Finalement, neuf points uniformément répartis sur l'image ont été conservés. La correction géométrique retenue utilise un polynôme d'ordre deux et un rééchantillonnage de type convolution cubique). L'erreur de positionnement RMS est de 0,5 pixel en X et 0,4 pixel en Y. La visualisation à l'écran de l'image superposée sur la carte topographique numérisée permet de constater la qualité de l'opération de correction.

Il est alors possible de mesurer l'effet de repli causé par le relief de la surface visée. Ce phénomène est propre aux images RSO et, selon la documentation du logiciel EASI/PACE, le déplacement est, pour un relief moyen, de l'ordre de 100 m d'écart pour 100 m de différence d'altitude. La carte topographique révèle que l'altitude varie de 200 m à 400 m. Une vérification à plusieurs endroits sur la carte a montré que l'écart dépasse rarement 75 m, et il est souvent entre 25 m et 50 m. On peut donc estimer que l'erreur induite par le repli dans le positionnement des linéaments est rarement supérieure à six pixels et le plus souvent de deux ou trois pixels.

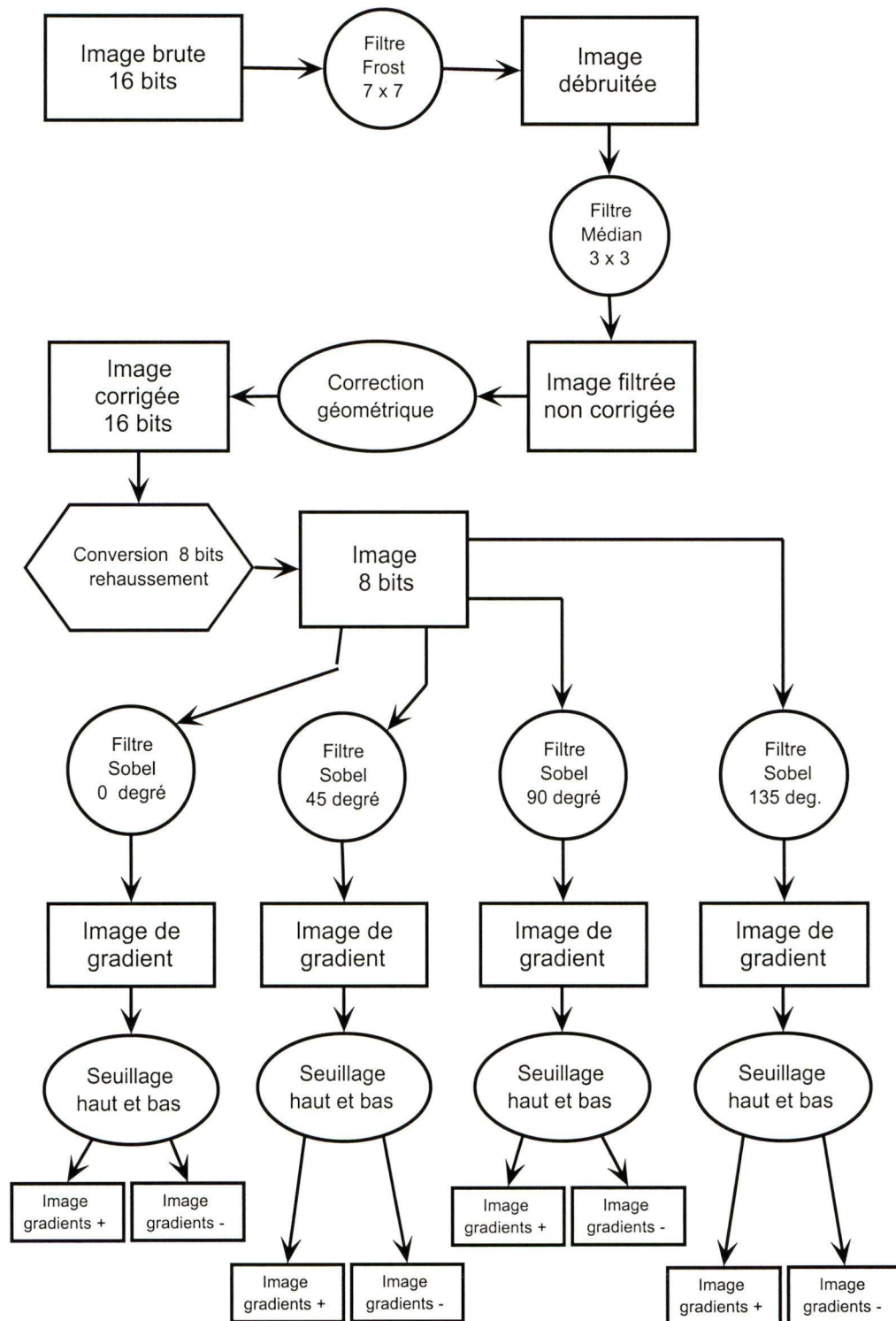


Figure 5 – Organigramme du traitement de l'image RSO

Il n'est donc pas nécessaire, dans ce cas de cette étude, de recourir à des méthodes complexes de corrections comme la méthode photogrammétrique ou paramétrique proposée par Toutin (1998) pour les images RSO. Le traçage des linéaments se fait à la main et l'erreur d'appréciation dans la position exacte d'un linéament est supérieure à celle de la correction géométrique. Il en serait tout autrement si la zone d'étude se trouvait en milieu de hautes montagnes ou en terrain très accidenté.

L'image qui est à l'origine en format 16 bits par pixel est convertie ensuite en format 8 bits par pixel (256 valeurs possibles). Elle est aussi rehaussée de manière à présenter un histogramme de fréquence dont la moyenne est centrée sur la valeur de pixel 127. Les valeurs extrêmes 0 et 255 représentent les valeurs limites situées à trois fois l'écart type de part et d'autre de la moyenne. La procédure RESCALE du logiciel EASI/PACE permet d'effectuer toutes ces opérations. La dimension finale de l'image est de 3 010 pixels par 2 279 lignes et l'espacement des pixels est de 12,7 m.

4.3.3. Filtres directionnels

Il existe un grand nombre de filtres directionnels pouvant faire ressortir ou accentuer les contours dans une image. Plusieurs, comme le filtre Sobel, donnent une image du gradient présent dans l'image. Un contour, si on le traverse perpendiculairement, présente une variation rapide de la valeur des pixels et donc un gradient élevé en valeur absolue. On remarque qu'on peut obtenir des valeurs de gradient négatives aussi bien que positives. Une plage unie ou un contour parallèle à la direction du filtre donnent un gradient nul. L'expérimentation avec des filtres Sobel de taille 5×5 , 9×9 , 15×15 et 31×31 et contenant des coefficients variés a permis de conclure que le filtre 5×5 est le plus valable. Les filtres de grande taille créent des artefacts. Afin de maximiser l'extraction des linéaments dans toutes les directions, des filtres Sobel orientés à 0° , 45° , 90° et 135° sont appliqués sur l'image. La figure 6 montre les filtres utilisés.

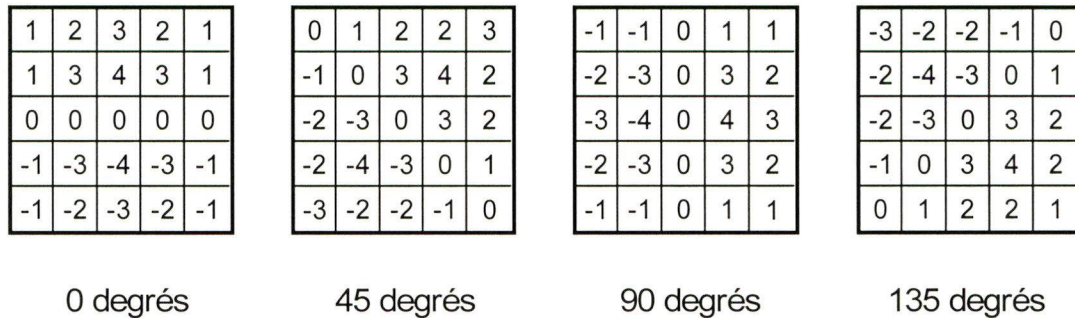


Figure 6 – Filtres directionnels Sobel 5 × 5

Le produit de chacun de ces filtres est donc une image du gradient qui est enregistrée dans le mode 16 bits avec signe. Les valeurs doivent donc être comprises entre plus 32 000 et moins 32 000. Le gradient nul, très près de la valeur moyenne, a une valeur de 0. L'histogramme de fréquence de l'image du gradient montre une courbe normale très platikurtique. L'image du gradient est ensuite convertie dans le format 8 bits sans signe et où le gradient 0 aura la valeur 127. Les gradients très négatifs seront près de 0 et les plus positifs près de 255. L'image peut être alors visualisée sur écran sans autre forme de manipulation.

Les linéaments se manifestent par des gradients élevés en valeur absolue. Il est possible de les repérer dans les alignements de valeurs faibles, voisines de 0 (en noir). Il est aussi possible de les repérer dans les alignements de pixels de valeurs élevées, voisines de 255, (en blanc). Les gradients nuls seront gris, autour de 127, c'est le cas pour la surface d'un lac. Il est possible de simplifier encore plus cette image des gradients pour ne garder que les valeurs extrêmes. C'est ce qui est fait dans l'étape suivante.

4.3.4. Seuillage et images binaires

Afin d'obtenir une image ne montrant que les gradients élevés une opération de seuillage est faite sur l'image des gradients. Le choix de ce seuil pose deux problèmes. Si l'on retient une population de pixels trop grande (un seuil trop élevé) beaucoup de linéaments ne pourront plus être discernés dans la masse de pixels conservés. Si l'on retient une population de pixels trop faible (un seuil trop bas) les linéaments discontinus disparaissent ou ne sont plus que de rares points. Un seuil acceptable fut déterminé comme étant le 6 % en population à chaque extrémité de l'histogramme de fréquence. Une opération d'arithmétique transforme en image binaire ces 6 %. On obtient donc deux images, une qui montre les gradients négatifs élevés de l'image 16 bits avec signe et l'autre qui montre les gradients positifs élevés de cette même image 16 bits. Les pixels ayant un gradient élevé ont alors la valeur 255 et les autres la valeur 0. Le traçage des linéaments peut se faire sur ces huit images binaires.

Afin de maximiser le nombre de linéaments, le repérage visuel est utilisé pour le traçage des linéaments. Tout alignement de points ou de segments peut ainsi être reconnu et tracé sur la couche vectorielle. Le nombre de linéaments perdus est ainsi réduit au minimum.

Ces images binaires se sont avérées cependant montrer une grande quantité de contours indésirables comme les routes, les limites de culture, le contact entre la forêt et les champs. Les linéaments ayant pour origine des crêtes topographiques y étaient repérables. Par contre, beaucoup de linéaments repérés visuellement sur l'image TM n'étaient pas visibles sur cette image RSO binarisée. C'est le cas, surtout, des groupes orientés nord-sud et est-ouest. Dans le cas de notre zone d'étude l'utilisation des images de gradients, tant sur l'image RSO que sur l'image TM, n'a pas apporté de compléments de linéaments pour la carte finale. Seuls les linéaments obtenus par la technique de repérage visuel direct utilisée finalement sur l'image TM de Landsat 5 ont été retenus pour les analyses et les interprétations ultérieures.

4.4. Traitement de l'image TM

Une image de base couvrant la zone d'étude est découpée de l' image source. Elle inclut les trois bandes TM3, TM4 et TM5 et couvre le terrain d'étude. Sa dimension est de 4 000 par 4 000 pixels. La figure 7 illustre la séquence d'opération décrite plus bas.

4.4.1. Analyse en composante principale (ACP)

L'examen visuel des canaux 4 et 5 de l'image TM permet de repérer les mêmes linéaments sur chacune de ces images. Ces deux images se ressemblent beaucoup. Dans le but de simplifier le travail et de conserver le maximum d'information sur les linéaments, l'utilisation de l'analyse en composante principale semblait appropriée. Les canaux TM4 et TM5 contiennent chacune une information redondante et une qui ne l'est pas. Appliquée à plusieurs canaux, l'ACP est une transformation qui permet d'obtenir un nombre réduit de canaux tout en conservant le maximum d'information (Daultrey, 1976).

Les deux canaux infrarouges TM4 et TM5 sont converties en deux composantes images, PC1 et PC2. Un module de EASI/PACE exécute ce traitement et fournit les statistiques. L'image PC1 explique 81 % de la variance. Cette composante PC1 contient donc le maximum d'information. L'examen visuel de l'image de la composante PC2 sur écran permet de juger si de l'information liée aux linéaments est délaissée. Il a été constaté que l'image PC2 caractérisait surtout certains types de terrains cultivés et aussi les rives des cours d'eau. Cette image PC2 ne contenait pas de phénomènes linéaires. On n'en détectait aucun visuellement, même après un rehaussement. L'usage de l'image PC1 seulement comme image de travail est donc un choix justifiable.

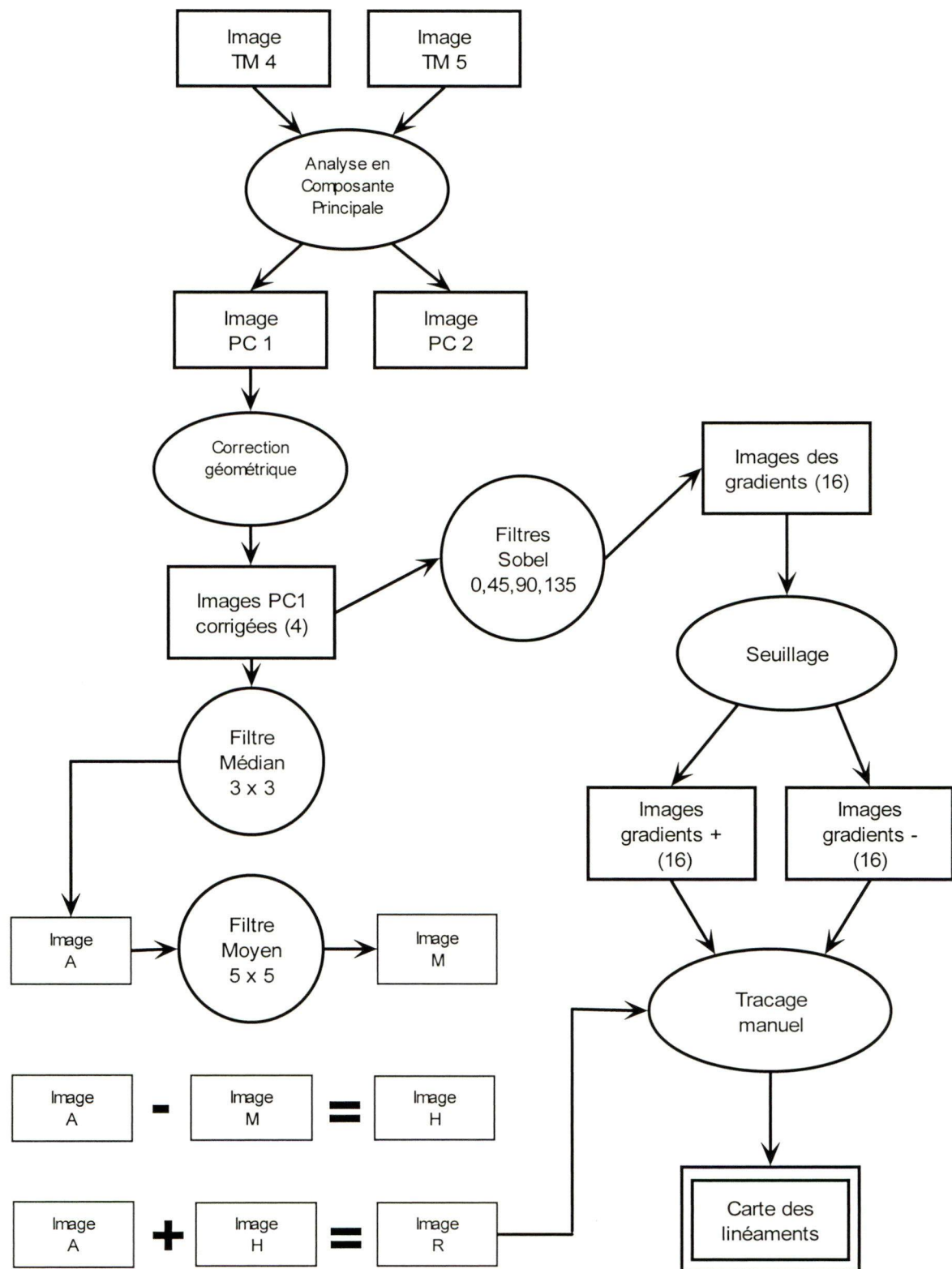


Figure 7 – Organigramme du traitement des images TM

4.4.2. Correction géométrique

Quatre sous-images corrigées sont tirées de l'image de base. Elles recouvrent chacune une des quatre cartes topographiques utilisées, avec une marge. Le processus est identique à celui de l'image RSO. Douze à quinze points de contrôle au départ étaient suffisants. La correction se fait en utilisant entre sept et dix points de contrôle, un polynôme d'ordre 1 et un rééchantillonnage de type cubique. L'image étant déjà géoréférencée au départ, un polynôme d'ordre supérieur n'apportait rien de sensiblement mieux. L'erreur de positionnement RMS est d'environ 0,5 pixel en X et 0,4 pixel en Y pour les quatre images. L'effet de repli n'existe pas ici mais on a affaire à une erreur de parallaxe due au relief. Selon la documentation en ligne de PCI, elle est estimée à 10 m d'erreur par 100 m de différence d'altitude dans une zone de relief moyen. Une comparaison à l'écran de la carte topographique superposée à l'image permet de vérifier que c'est à peu près le cas pour les quatre images utilisées. On peut donc estimer que cette erreur est la plupart du temps inférieure à deux pixels, environ 50 m, dans le cas de notre image.

Cette précision pourrait être améliorée par l'usage de la méthode photogrammétrique proposée par De Sève *et al.* (1996) et Toutin (1996) pour les images Landsat TM et RSO de ERS-1. Il faut cependant considérer que le repérage et le traçage des linéaments se font de façon visuelle et que l'erreur d'appréciation est probablement plus grande que celle liée aux déficiences de la correction géométrique par une méthode polynomiale.

Les quatre sous-images, nommées selon la carte topographique visée, ont les dimensions suivantes, en pixels. (espacement de pixels : 25 m) :

–Beauceville 21 L/2 :	1 672 × 1 297
–Saint-Joseph-de-Beauce 21 L/7 :	1 664 × 1 297
–Sainte-Justine 21 L/8 :	1 672 × 1 286
–Saint-Magloire 21 L/9 :	1 664 × 1 286

4.4.3. Rehaussement des linéaments

Le but de cette étape est essentiellement d'augmenter la visibilité des linéaments. Une méthode omnidirectionnelle était préférable et jugée plus objective puisque l'on ne connaît pas, a priori, l'orientation des linéaments. La méthode par soustraction et addition retenue remplissait ces deux exigences. Il fallait cependant déterminer la taille des filtres la plus adaptée pour le cas bien précis des linéaments de notre image PC1. Beaucoup d'entre eux étaient déjà visibles et il était donc possible de juger si telle combinaison de filtre améliorerait plus ou moins la visibilité. Des essais ont été faits avec les filtres médian 3×3 et 5×5 et les filtres moyen 5×5 , 7×7 et 9×9 . Le résultat visuellement le plus acceptable dans le cas de notre image a été obtenu avec les filtres médian 3×3 et moyen 5×5 . Voici les étapes de la méthode par soustraction et addition. La figure 7 illustre les opérations décrites.

- 1) Un filtre médian 3×3 appliqué sur l'image de PC1 : Le résultat va dans l'image A. Comme mentionné précédemment, ceci est fait dans le but de lisser l'image tout en préservant les contours. On vise surtout à éliminer un bruit dont la fréquence est plus élevée que celle qui caractérise, en général, les linéaments recherchés.
- 2) Un filtre moyen 5×5 appliqué sur l'image A : Le résultat va dans l'image M. Cette image ne retient que les variations de valeurs de pixels qui ont de plus basses fréquences spatiales. L'image visualisée apparaît alors légèrement floue.
- 3) L'image M est soustraite de l'image A : Le résultat va dans l'image H. C'est l'image montrant les hautes fréquences qui sont associées à un gradient plus élevé et donc, possiblement, à des linéaments.
- 4) L'image A est additionnée à l'image H : On obtient l'image R ou image rehaussée avec les linéaments plus visibles.

4.4.4. Traçage des linéaments

Les essais similaires à ceux de l'image RSO, avec les filtres Sobel, ont permis de générer des cartes de gradients élevés. Le processus est donc identique à celui utilisé pour le traitement de l'image RSO. Le problème causé par la traînée de vapeur d'eau est en partie contourné par l'utilisation d'un seuil plus élevé compensant pour des gradients plus faibles en moyenne dans la zone affectée. On utilise donc un seuil de 12 % lors de l'opération de seuillage dans les zones ennuagées et un seuil de 6 % ailleurs.

Comme dans le cas de l'image RSO, le repérage des linéaments sur ces cartes de gradients n'a pas conduit à des résultats satisfaisants. L'activité humaine sous toutes ses formes génère une quantité de phénomènes linéaires rendant la recherche visuelle de linéaments géologiques très difficiles. Ces phénomènes linéaires agissent comme un bruit de fond masquant l'information géologique.

Une méthode de traçage manuel, utilisée sur l'image TM, a cependant donné des résultats acceptables pour la poursuite du projet. Les images rehaussées sont imprimées sur format papier 28 cm par 43 cm (11 × 17 po). Ces images sur papier sont placées sur une table à numériser, les coordonnées des quatre coins étant connues avec précision. Chaque image est observée avec minutie et les linéaments repérés sont entrés directement dans le SIG, sur une couche vectorielle de la carte topographique correspondante. Comme mentionné précédemment, elles débordent de 10 % environ le cadre de la carte topographique. Chaque image est complétée successivement dans les mêmes conditions d'éclairement.

Afin de conserver l'objectivité de la démarche, aucune confrontation ou vérification n'est faite avec les données déjà intégrées dans le SIG avant que le traitement des quatre images soit terminé. Une fois toute l'opération terminée, les cartes sont visualisées sur écran pour confronter la couche des linéaments avec celle des routes, du réseau hydrographique et des formations géologiques. Seul les linéaments visible-

ment artificiels et d'origine humaine sont éliminés. Le traçage ayant été fait sur une base sélective, il s'est avéré que très peu de linéaments étaient rejetés à cette étape.

L'annexe 1 présente ces quatre cartes à l'échelle de 1 : 125 000 sur un format papier de 28 cm par 43 cm. Chacune des quatre cartes est détaillée de façon à permettre un repérage des linéaments sur le terrain. Afin de conserver une lisibilité adéquate les couches présentant l'hydrographie et la géologie sont omises. Ces cartes sont ensuite assemblées en une seule et les linéaments sont raccordés là où ils sont dans le prolongement l'un de l'autre. La figure 8, produite par le logiciel PAMAP-GIS, la montre à l'échelle de 1 : 500 000.

Cette carte des linéaments est le principal résultat matériel de ce projet. Elle est essentielle pour atteindre l'objectif du projet. Dans le prochain chapitre, la carte des linéaments est l'objet d'une analyse visant à l'interpréter en fonction des structures géologiques déjà connues et identifier les liens possibles avec la gîtologie.

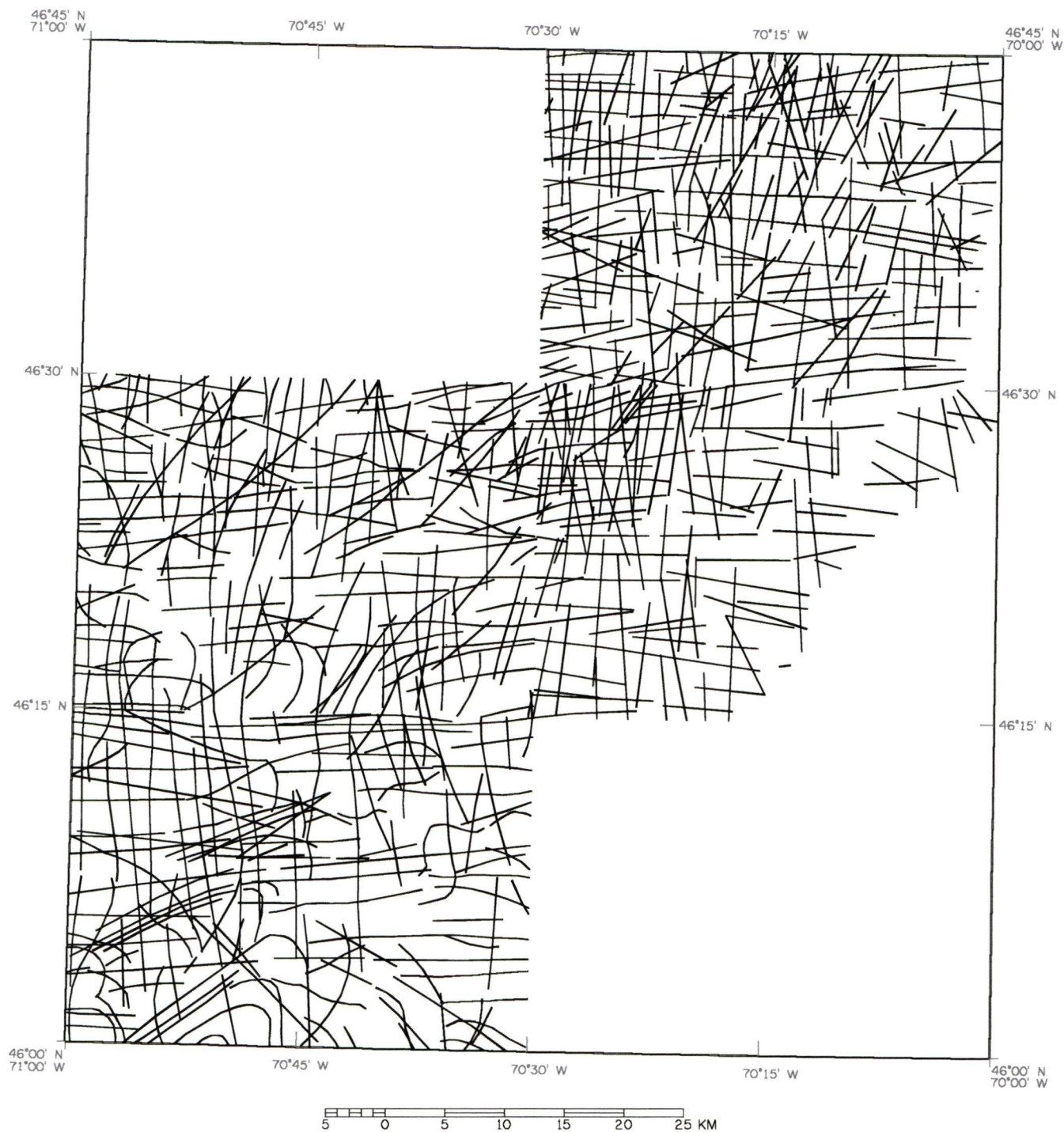


Figure 8 – Carte des linéaments

5. Analyse de la carte des linéaments

Le résultat du traitement des images satellitaires est une carte montrant 739 linéaments dont la longueur totale est de 5 257 km. Il importe maintenant de vérifier si cette carte contient une information pertinente aux structures géologiques.

5.1. Reconnaissance visuelle

En examinant la carte des linéaments (figure 8), on constate que l'ensemble des linéaments présente une organisation qui ne tient pas du hasard. On note un regroupement selon deux orientations, une dans le sens nord-sud et l'autre dans le sens est-ouest. L'orientation sud-ouest nord-est forme un troisième groupe plus restreint. Une vérification avec la carte géologique confirme que les linéaments de ce dernier groupe concordent souvent avec les failles de chevauchement et les contacts lithologiques.

La région au sud montre une trentaine de linéaments curvilignes. Certains de ces linéaments sont produits par le relief des strates de tufs felsiques présentes dans la Formation de Saint-Victor. Un autre groupe curviligne semble se répartir de part et d'autre de la rivière Chaudière. On remarque aussi que la densité des linéaments varie d'un endroit à l'autre et qu'une bande au sud-est de la carte semble être sensiblement moins dense.

Une remarque intéressante ici concerne le réseau hydrographique. Pris dans son ensemble, le réseau hydrographique a très peu en commun avec la carte des linéaments. En s'attardant aux détails, on note que quelques cours d'eau importants s'inscrivent sur une certaine distance dans un linéament. C'est le cas de la rivière Famine surtout. En plusieurs endroits, des cours d'eau mineurs s'encastrent dans un linéament sur une faible distance. Plusieurs lacs ont leurs rives délimitées par des linéaments. Le lac Etchemin est un bon exemple. Malgré ces quelques concordances on ne peut pas dire que le réseau des linéaments est décelable par l'examen du

réseau hydrographique. Dans une étude sur une région du centre de la Turquie, on a constaté que le patron de drainage est le plus important facteur contribuant à la carte des linéaments (Süzen and Toprak, 1998). Cette différence s'explique par l'absence des glaciations cycliques du Quaternaire en Turquie. Au Québec, les glaciations viennent périodiquement éroder une couche de terrain et effacer le réseau hydrographique dans sa plus grande partie. Encore une fois, la problématique des linéaments varie selon le lieu étudié.

5.2. Statistiques de la carte des linéaments

Si on veut préciser un peu plus, il est très pertinent ici de diviser la carte selon les trois domaines géologiques qui ont été décrits au chapitre 3. Il y a donc, au nord-ouest, le domaine des nappes internes, au centre, le domaine océanique qui est notre zone d'étude *sensus stricto*, et enfin au sud-est, le synclinorium Connecticut Valley – Gaspé.

Le tableau 4 permet de comparer les principales statistiques sur ces trois zones. Rappelons que les 739 linéaments totalisent 5 257 km. La deuxième colonne indique la longueur propre à chaque domaine. Il est possible de considérer tout ces linéaments qui se croisent comme un réseau formé de segments et de points de jonction de ces segments. Les colonnes « nombre de segments » et « longueur moyenne d'un segment » présentent alors un intérêt.

Le fait le plus important à constater est que le synclinorium Connecticut Valley – Gaspé montre une densité linéaire de linéaments qui est 34 % plus faible que les deux autres domaines combinés. Ces deux autres domaines ont presque la même densité linéaire de linéaments.

Tableau 4 - Statistiques de la carte des linéaments

Région	Superficie (km ²)	Longueur totale de linéament (km)	Densité linéaire (m · km ⁻²)	Nombre de segments	Longueur moyenne d'un segment (km)
Nappes internes	1 000	1 442	1 442	2 252	0,640
Domaine océanique	1 864	2 693	1 445	4 167	0,646
Syncl. Conn. Valley-Gaspé	1 176	1 122	954	1 403	0,800
La zone entière	4 040	5 257	1 301	7 822	0,672

Cette carte des linéaments peut être analysée au-delà d'une simple description statistique. Il faut tenter de trouver les caractéristiques zonales de ces linéaments afin d'en tirer le maximum d'information applicable aux structures géologiques. On peut considérer des variations dans l'orientation, dans la densité et dans le nombre de croisements ou intersections de linéaments. Les orientations sont étudiées dans la section qui suit.

5.3. Rosaces directionnelles

Les rosaces directionnelles sont souvent utilisées en géologie comme moyen d'analyse. Dans le cas présent, c'est un excellent moyen de visualiser l'organisation spatiale des linéaments. Un programme fait en Auto-LISP (langage d'AutoCAD) est utilisé pour tracer ces rosaces automatiquement à partir d'une couche vectorielle dans un fichier AutoCAD (Deslandes, 1988; Saint-Jean, 1991). Un regroupement par tranche de dix degrés est généralement considéré comme le plus approprié en géologie. La longueur de chaque branche indique le pourcentage de la longueur totale de linéament utilisé pour faire la rosace.

Une première rosace est tracée pour la carte des linéaments au complet (figure 9). Nous constatons que les linéaments ont deux orientations principales. Elles sont décalées de 90°. On note une forte composante nord-sud et une autre est-ouest. 27 % des linéaments sont dans le groupe nord-sud (en prenant une marge de 10° de part et d'autre l'axe nord-sud) et 34 % sont dans le groupe est-ouest. 61 % des linéaments font partis de ces groupes conjugués. Les autres orientations se partagent inégalement autour d'un axe orienté nord-est sud-ouest.

Ensuite, chacun des trois domaines géologiques couvrant notre région d'étude est l'objet d'une rosace séparée. La figure 10 montre le découpage effectué dans ce but sur la carte des linéaments. Les zones limitrophes longeant les deux failles de chevauchement séparant ces domaines sont masquées et ne participent pas à l'élaboration des rosaces. La figure 11 montre ces trois rosaces. Les trois domaines géologiques ne semblent pas se différencier sous cet aspect. L'orientation est-ouest totalise une longueur de linéaments légèrement plus élevée que l'orientation nord-sud dans chacun des trois domaines géologiques.

Finalement, afin de vérifier si des variations existent à l'intérieur de chaque domaine, une zone circulaire est visée dans sept endroits différents et fait l'objet d'une rosace. Ces zones sont choisies les plus grandes possibles et placées sur la carte là où il pourrait y avoir un patron différent d'orientation. Ces zones circulaires sont identifiées

de 1 à 7 sur la figure 10. La figure 12 regroupe les sept rosaces, ce qui permet de comparer plus facilement les variations locales. On remarque que ces zones respectent le patron général déjà observé, sauf la zone 6 où l'orientation nord-sud disparaît presque.

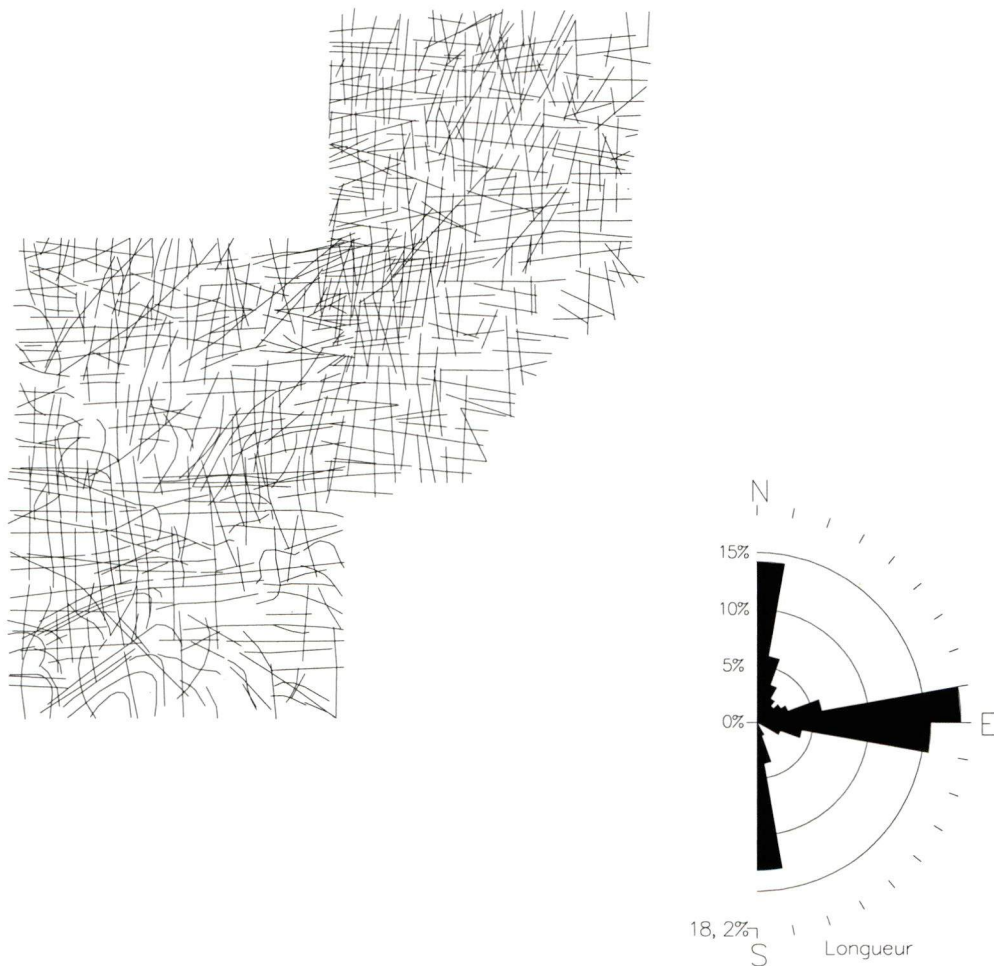


Figure 9 – Rosace directionnelle de la carte des linéaments

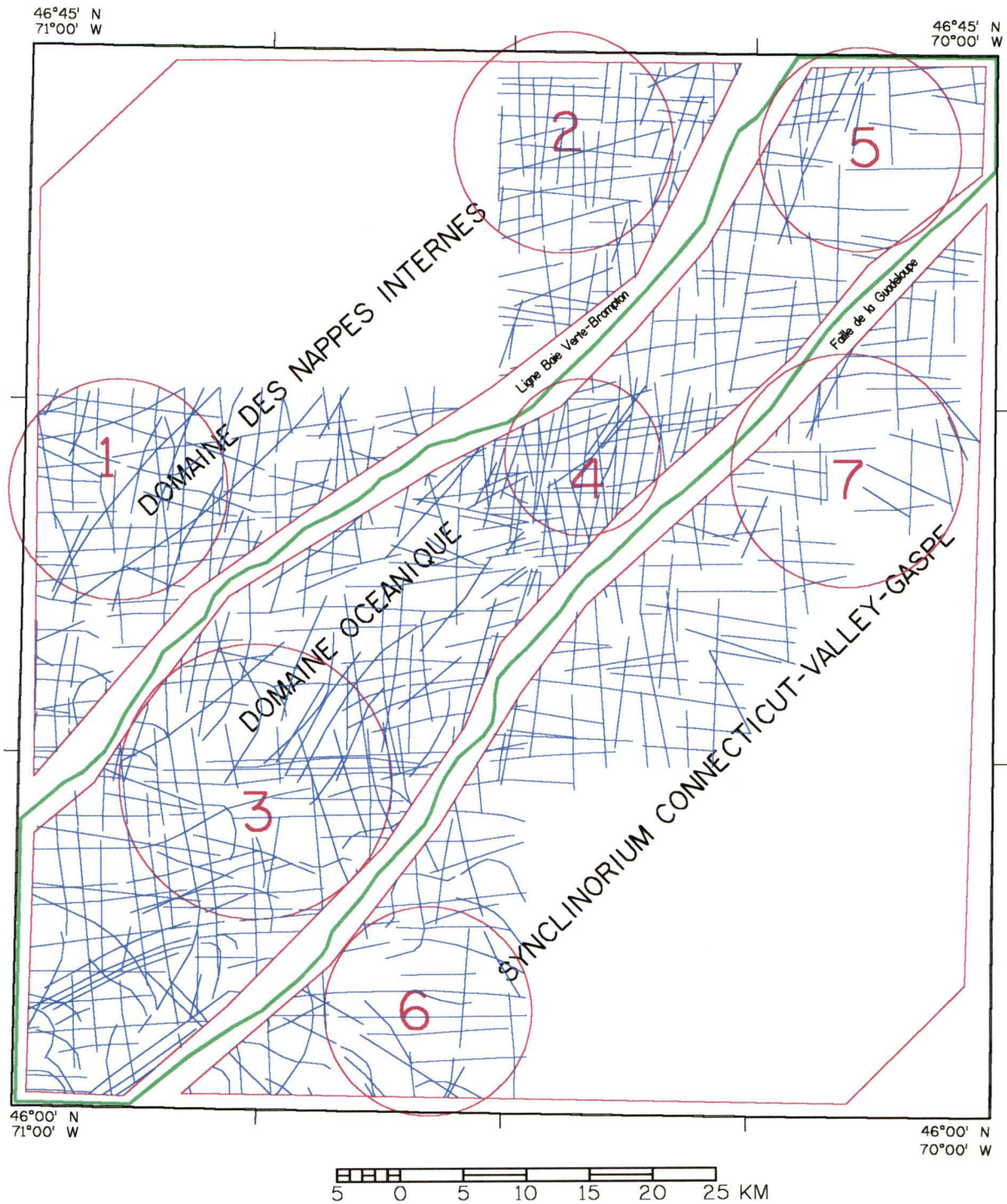


Figure 10 – Rosaces; découpage de la carte en secteurs

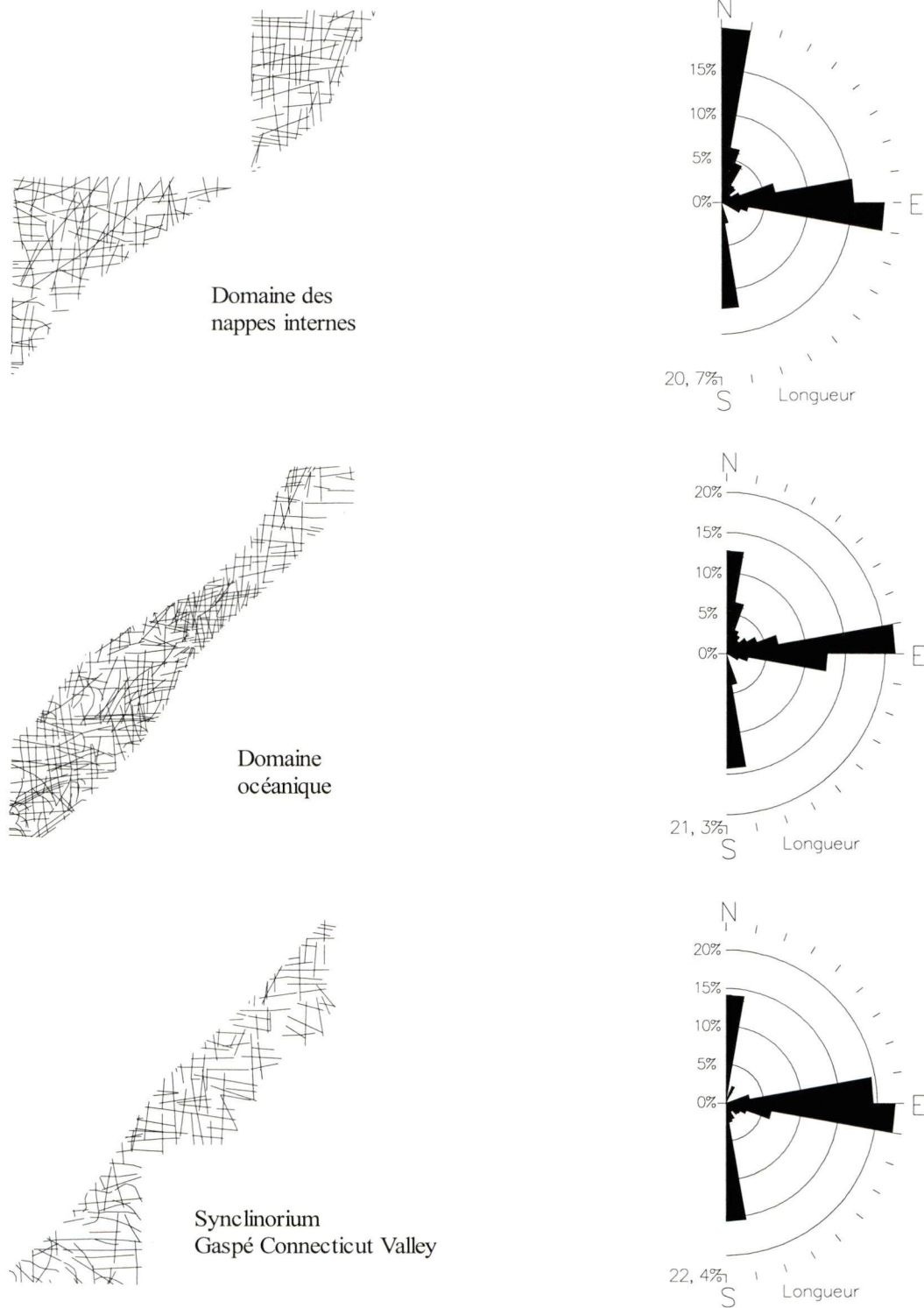


Figure 11 – Rosaces directionnelles des trois domaines géologiques

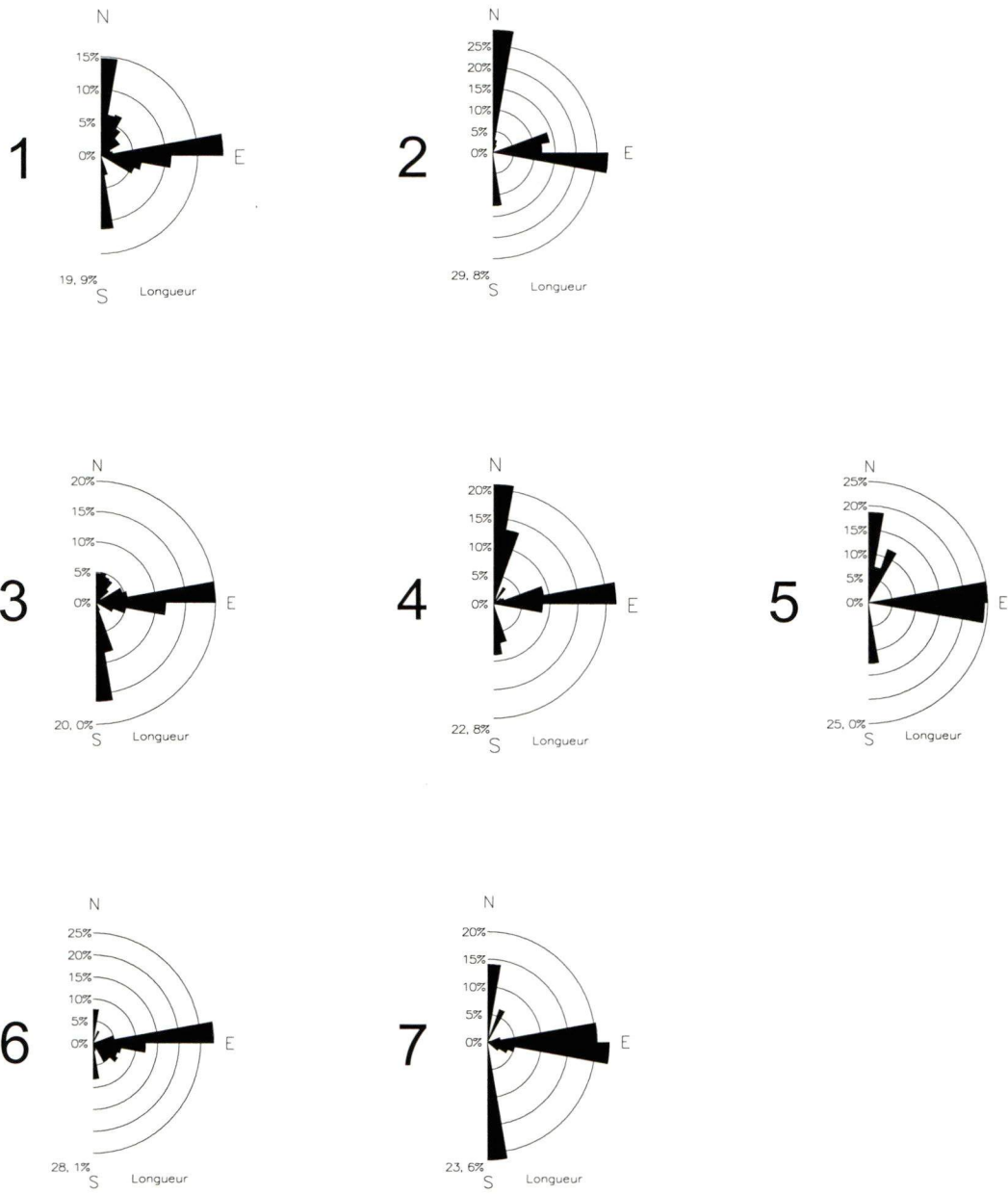


Figure 12 – Rosaces des sept zones circulaires

5.4. Grille d'analyse


Afin d'analyser des données à caractères spatiaux il faut disposer d'un élément spatial de base dans lequel une caractéristique donnée aura une valeur unique. Cet élément spatial de base est une cellule. Comme c'est souvent le cas dans une analyse cartographique, l'usage d'une grille superposée sur la zone d'étude est une méthode très adéquate. Dans ce cas ci, cette grille est composée de cellules carrées de superficie égale (figure 13).

Des essais ont été faits avec une taille de cellule de 3 km, de 2,5 km et de 2 km de coté. La cellule de 2 km par 2 km fut jugée le meilleur compromis entre une résolution plus élevée des variations spatiales et l'exigence d'avoir un minimum de cellules avec une valeur nulle. Cette exigence venait du module d'analyse par surface de tendance du logiciel IDRISI. Les valeurs nulles y sont considérées comme indéterminées et font l'objet d'une interpolation ou d'une extrapolation selon leur situation sur la grille.

Le choix de cette taille de cellule est en accord avec la formule empirique mentionnée par Miller and Kahn (1958). En effet, si on considère le cas de la carte des croisements de linéaments analysée au chapitre 5, il y a 1 991 points répartis sur 4 040 km². La formule dit que la surface de la cellule doit égaler deux fois la surface totale divisée par le nombre de points. Cela donne 4,06 km².

La grille est générée à partir d'un point d'origine placé arbitrairement dans le coin sud-ouest, en coordonnées UTM. L'usage de coordonnées UTM pour ce quadrillage donne des cellules qui ont toutes exactement la même dimension au sol et qui présentent une distorsion négligeable liée à la projection cartographique. La dimension de la grille est de 38 colonnes par 41 lignes. Des 1 558 cellules 1 010 recouvrent la carte des linéaments. Le cadre de la carte, issu des coordonnées géographiques, ne coïncide donc pas parfaitement avec la grille, comme le montre la figure 13.

Dans le SIG, chacune de ces cellules possède une étiquette de polygone et est reliée à la base de données. Une variété de données spatiales peut ainsi être rattachées à cette grille. Ces données peuvent provenir de la carte des linéaments, du réseau



hydrographique ou de toute autre couche de vecteurs ou de polygones présents dans le SIG.

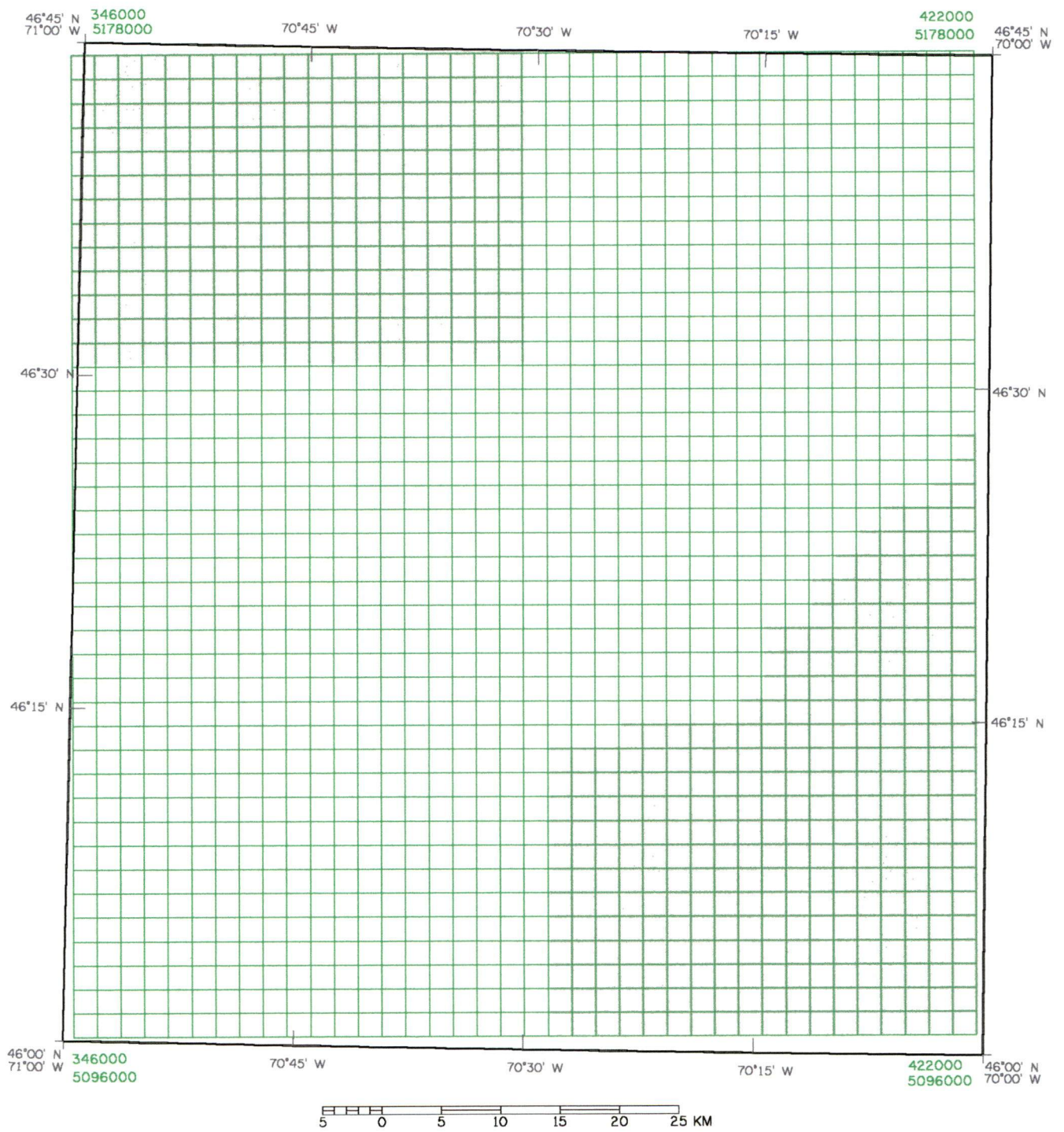


Figure 13 – Grille d'analyse, cellules de 2 km

5.5. Densité linéaire

La densité linéaire est mesurée en mètre de linéament par kilomètre carré de terrain. On ne tient pas compte de la direction. La densité linéaire est la plus importante caractéristique, après l'orientation, méritant une analyse. Le SIG permet, à l'aide de quelques manipulations, de calculer la longueur totale de linéament dans chaque cellule de la grille d'analyse (figure 13) et de placer cette valeur dans la base de données. Il est alors possible de faire une classification et de générer une carte de la densité linéaire des linéaments (figure 14). La classification utilise une répartition en intervalles égaux.

5.6. Croisements

De la même façon qu'à la section précédente, il est possible de compter le nombre de points où deux linéaments se croisent dans chaque cellule. On peut donc générer une carte des croisements (figure 15). Avec l'aide de la grille d'analyse, on peut produire une carte de la densité des croisements (figure 16).

5.7. Analyse par surface de tendance

L'analyse par surface de tendances fut populaire dès les années 60 en géographie (Unwin, 1975; Touez *et al*, 1976). L'équivalent, dans une dimension, est la régression polynomiale ou linéaire faite sur des données ponctuelles. On vise à faire plus que simplement visualiser l'allure générale de la répartition des données. Les variations locales des données doivent être découplées de la variation régionale que peuvent présenter ces mêmes données. Autrement, la signification d'un pic positif, par exemple, peut être exagérée en importance si cette région présente une moyenne très élevée par rapport aux autres régions.

Le logiciel IDRISI fut utilisé à cet effet puisque PAMAP/GIS ne possède pas le programme nécessaire. Excel et Access sont utilisés pour convertir les données aux formats exigés lors du transfert. Afin de s'assurer de la validité de l'opération, certains critères statistiques doivent se vérifier. Le test du F de Fisher est utilisé. Il se fonde sur des rapports de variance. Le même test du F permet de vérifier que la surface d'ordre trois ou cubique était préférable à la surface d'ordre deux ou quadratique pour la densité linéaire et la densité des croisements. La surface d'ordre un, le plan, est écartée pour des raisons liées à l'homoscédasticité, cette règle de base à appliquer dans toute régression linéaire ou polynomiale.

Les données libres de tendance sont représentées par la surface des résidus. La surface des résidus s'obtient en soustrayant la surface de tendances de la surface de densité. Les résidus doivent être centrés sur zéro et présenter une courbe normale. Les résidus sont porteurs d'informations et leur analyse consiste à visualiser cette surface des résidus et expliquer, ou à tout le moins constater, certains caractères de leur répartition spatiale. La signification de cette répartition par rapport aux structures et par rapport à la géologie est un objectif désirable de l'analyse des résidus.

5.7.1. Analyse de la densité linéaire

On constate (figure 17) que la surface de tendances de la densité linéaire des linéaments présente un fort gradient vers le nord-ouest, plus précisément à 317° selon le polynôme d'ordre un (la surface de tendance plane). La faille de la Guadeloupe marque la ligne de transition entre une densité forte au nord-ouest et une densité plus faible au sud-est. On remarque une diminution légère de la densité dans la portion sud.

La surface des résidus, classifiés selon les écarts types, permet de constater que le domaine océanique présente des zones importantes de pics de densité linéaire (figure 18). La région centrale est particulièrement affectée. Les deux autres domaines ne présentent pas cette caractéristique.

5.7.2. Analyse de la densité des croisements

La densité des croisements (figure 16) et sa surface de tendance (figure 19) ont un comportement identique à la densité linéaire. La proportion à peu près égale de linéaments orientés nord-sud et est-ouest explique ceci en bonne partie. La surface des résidus de la densité des croisements présente une étonnante similitude avec celle des résidus de la densité linéaire. Il suffit de comparer les figures 18 et 20. La densité des croisements apporte la même information que la densité linéaire. On peut donc se limiter à la seule étude de la densité linéaire, jugée plus importante, sans perdre d'information pertinente aux structures géologiques.

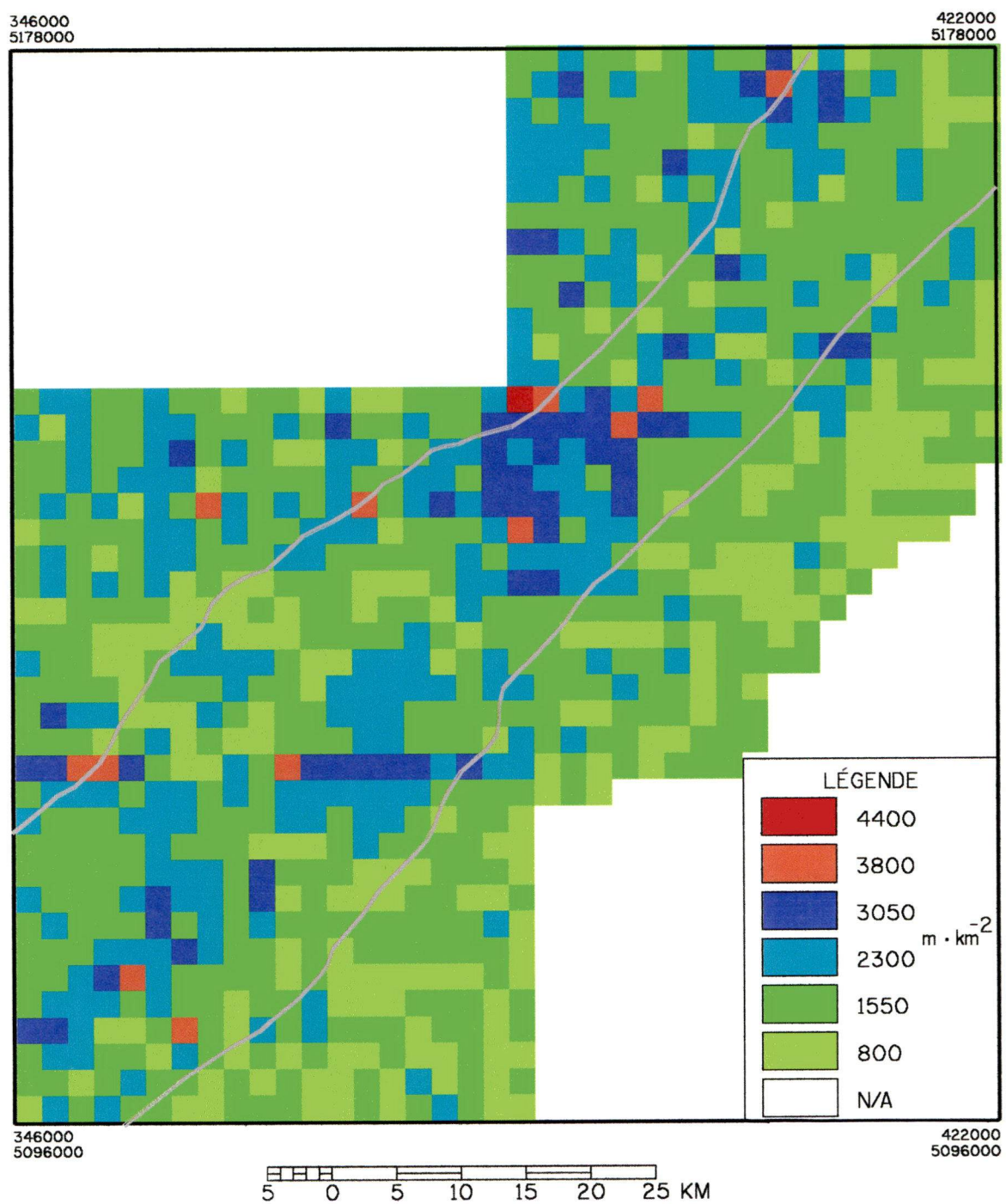


Figure 14 – Densité linéaire des linéaments

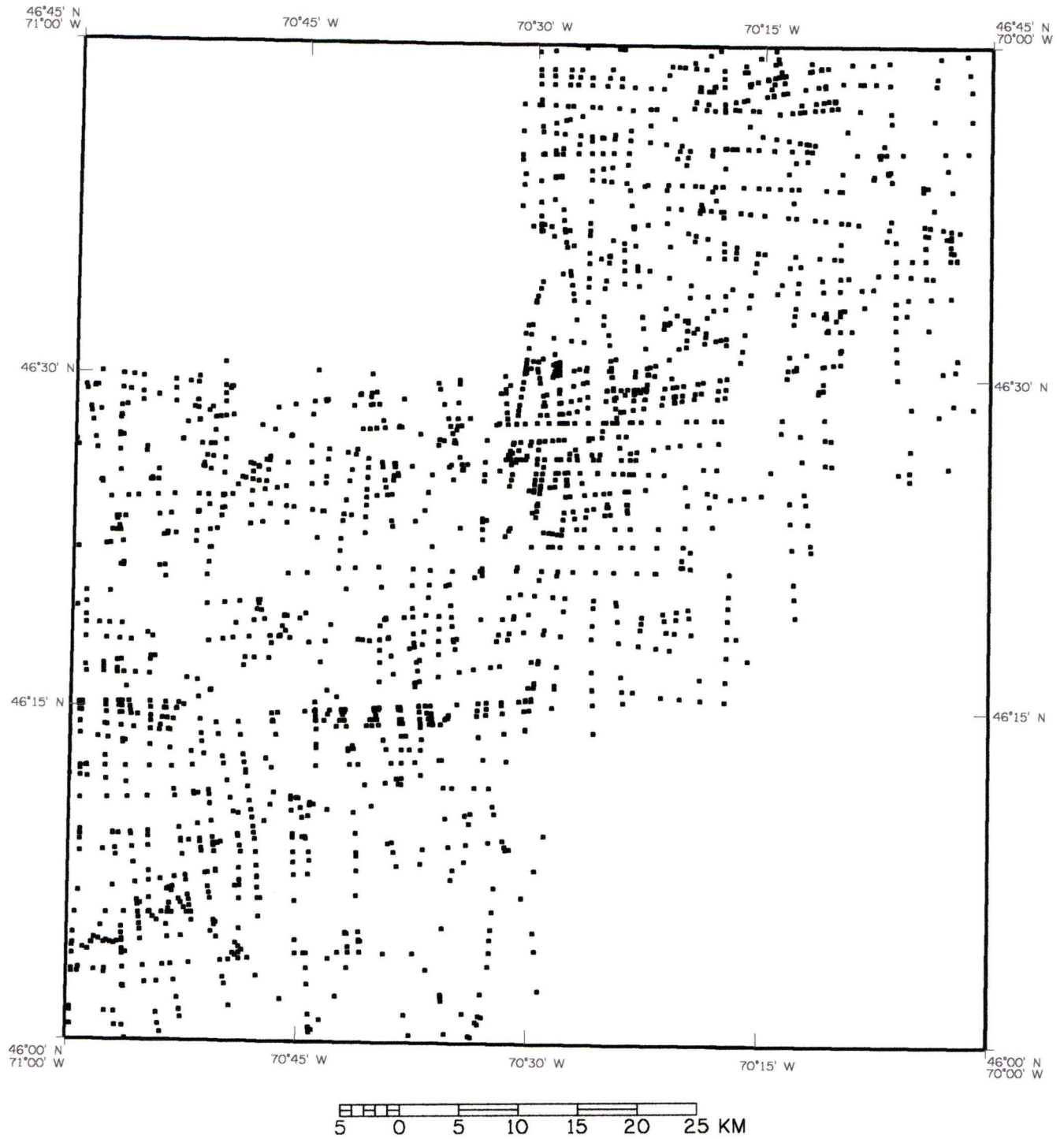


Figure 15 – Carte des croisements

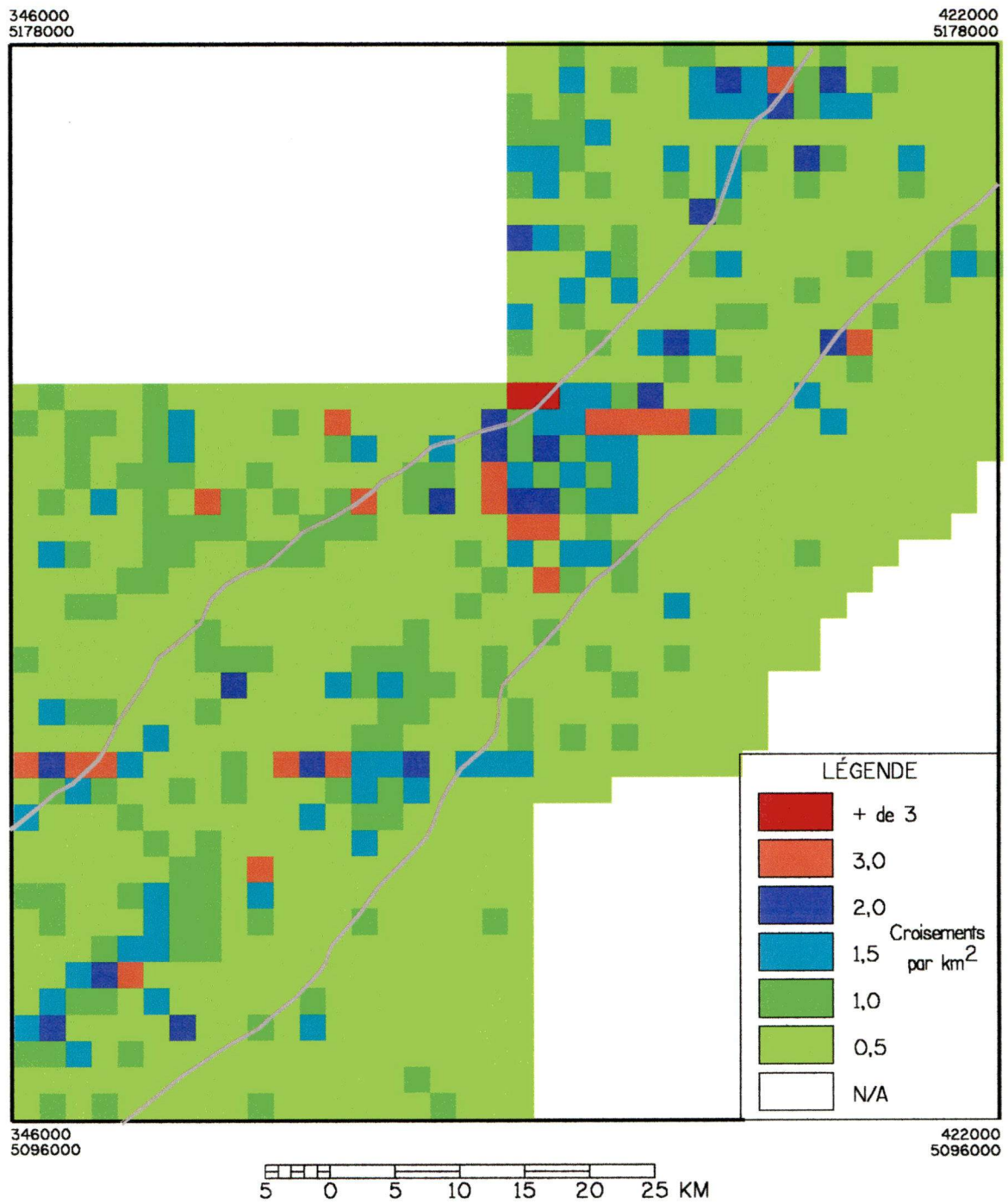


Figure 16 – Densité des croisements

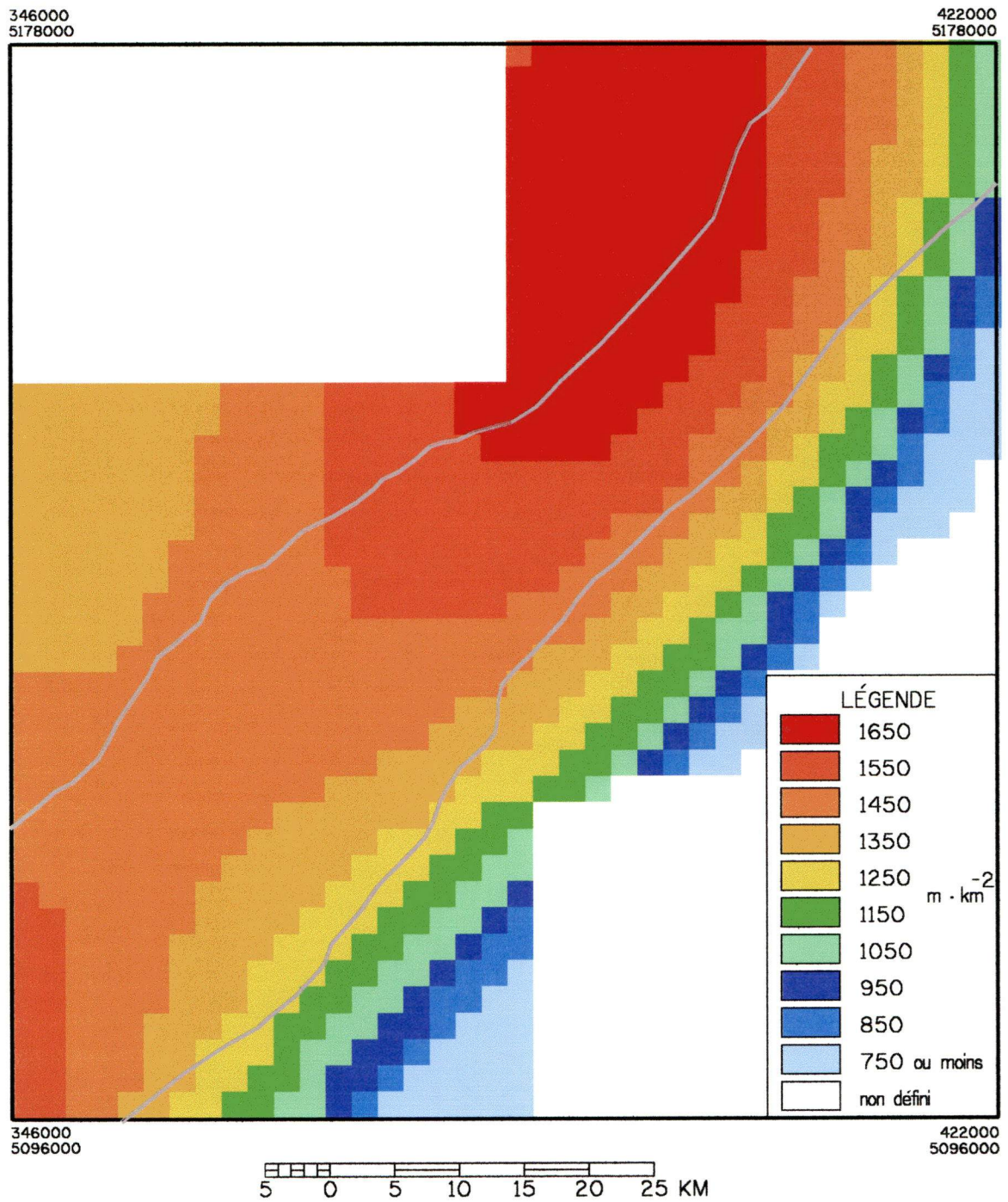


Figure 17 – Surface de tendance de la densité linéaire des linéaments

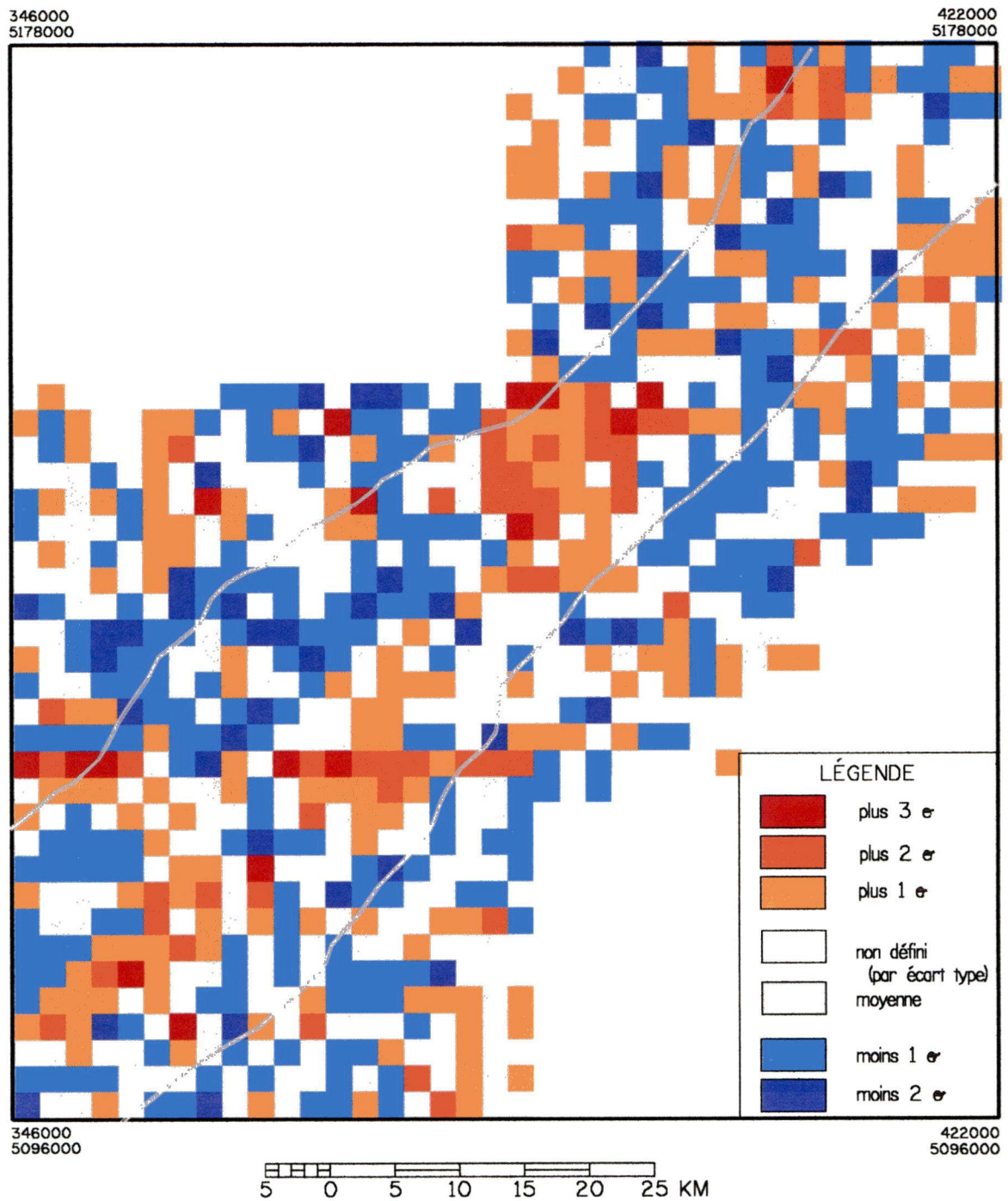


Figure 18 – Surface des résidus, densité linéaire

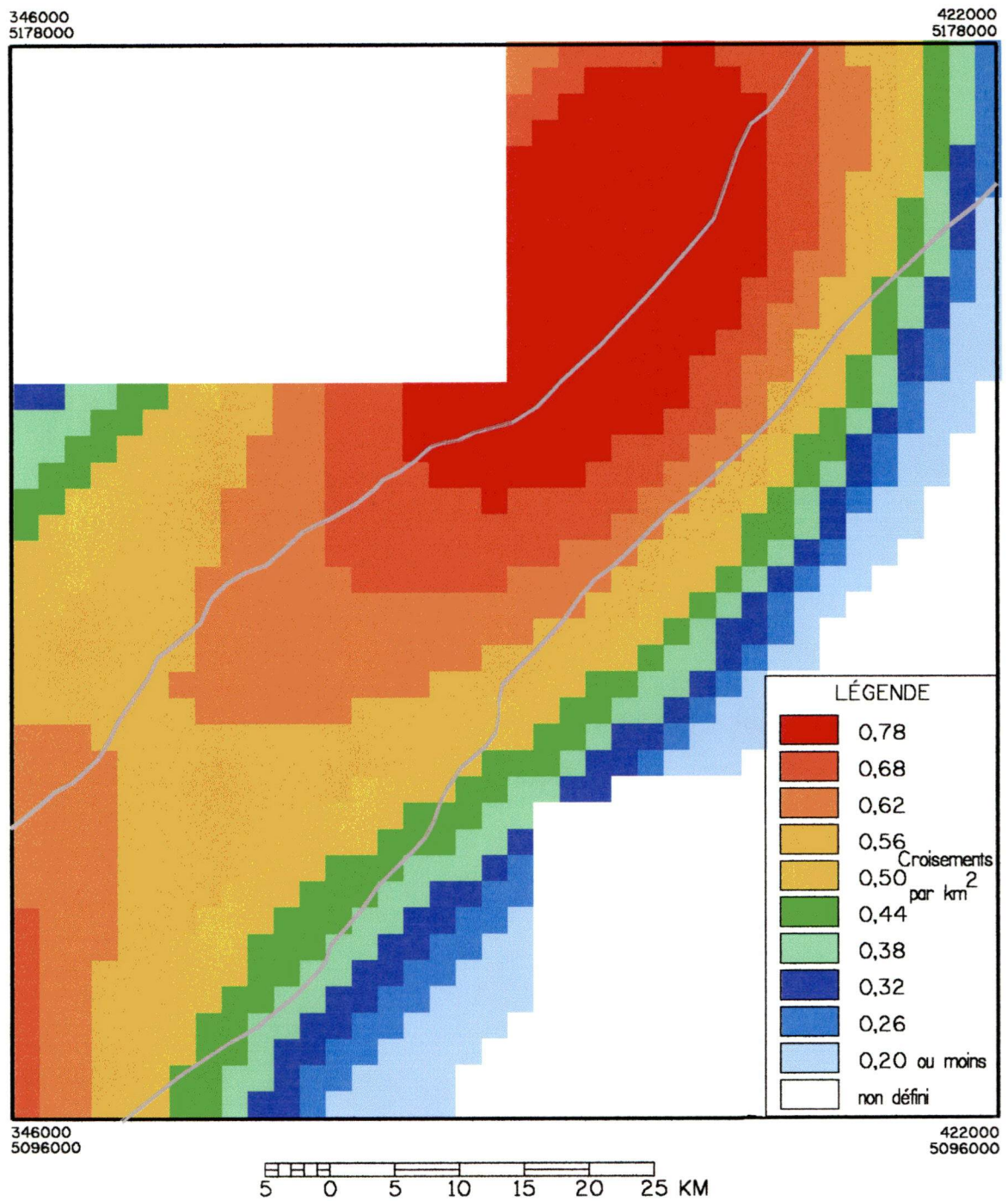


Figure 19 – Surface de tendance de la densité des croisements

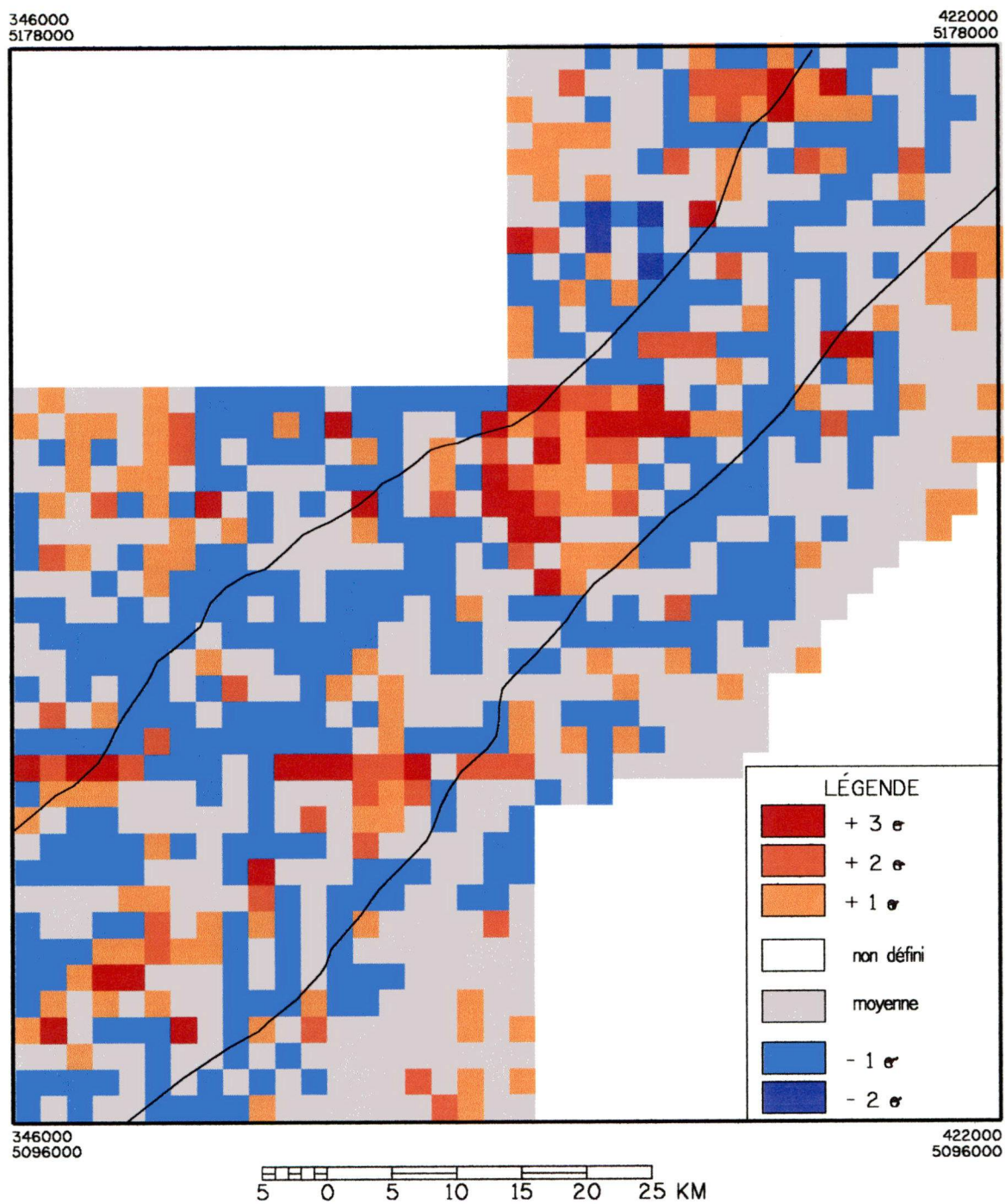


Figure 20 – Surface des résidus, densité des croisements

5.8. Indices géochimiques et linéaments

Les données disponibles proviennent d'une campagne de prélèvement de sédiments de ruisseaux réalisée par Cousineau (1987). Ces données sont complétées par une série d'indices miniers répertoriés et faisant parti du même manuscrit. Malgré que la zone couverte par ce rapport soit une partie seulement de celle couverte par notre étude, ces données ponctuelles fournissent un moyen de juger de l'utilité de la carte de linéaments pour la prospection. Les deux cartes de Saint Magloire et Sainte-Justine contient des indices répertoriés par Burzynski (1993) et Marquis (1992, 1992a). L'ensemble est présenté à la figure 21. L'or est présenté séparément des autres indices de métaux.

Le lien entre les indices géochimiques et les linéaments peut se manifester de deux façons. La première est que les indices se situent à proximité immédiate d'un linéament. La carte des indices est superposée à la carte des linéaments dans l'annexe 1, la visibilité étant meilleure à cette échelle plus grande. Visuellement, la tendance des indices à se localiser près d'un linéament semble se vérifier. Par contre, il n'a pas été possible de prouver statistiquement ce lien. La deuxième façon de se manifester pour un lien est par une association zonale. Il s'agit de vérifier si la densité régionale des linéaments présente des caractéristiques communes avec la densité régionale des indices géochimiques à teneur élevée. Les indices semblent avoir une tendance à se regrouper. Une carte montrant les indices versus les groupes de résidus positifs élevés de la surface de densité linéaire permet de juger d'un éventuel lien. On ne retient que les groupes montrant plus de six cellules de résidus positifs et qui sont situés, en partie au moins, dans le domaine océanique. Sur la carte de la figure 22, quelques groupes ont été délimités afin de pouvoir juger si un tel lien existe. Les zones de regroupement de résidus positifs élevés, au nombre de six, sont en grisé sur la carte.

L'examen de la carte de la figure 22 ne permet pas d'observer une relation entre la densité de linéaments et la présence d'un indice géochimique de teneur élevée. Il faut

cependant considérer et interpréter plusieurs facteurs avant de conclure. C'est ce qui sera fait au chapitre suivant.

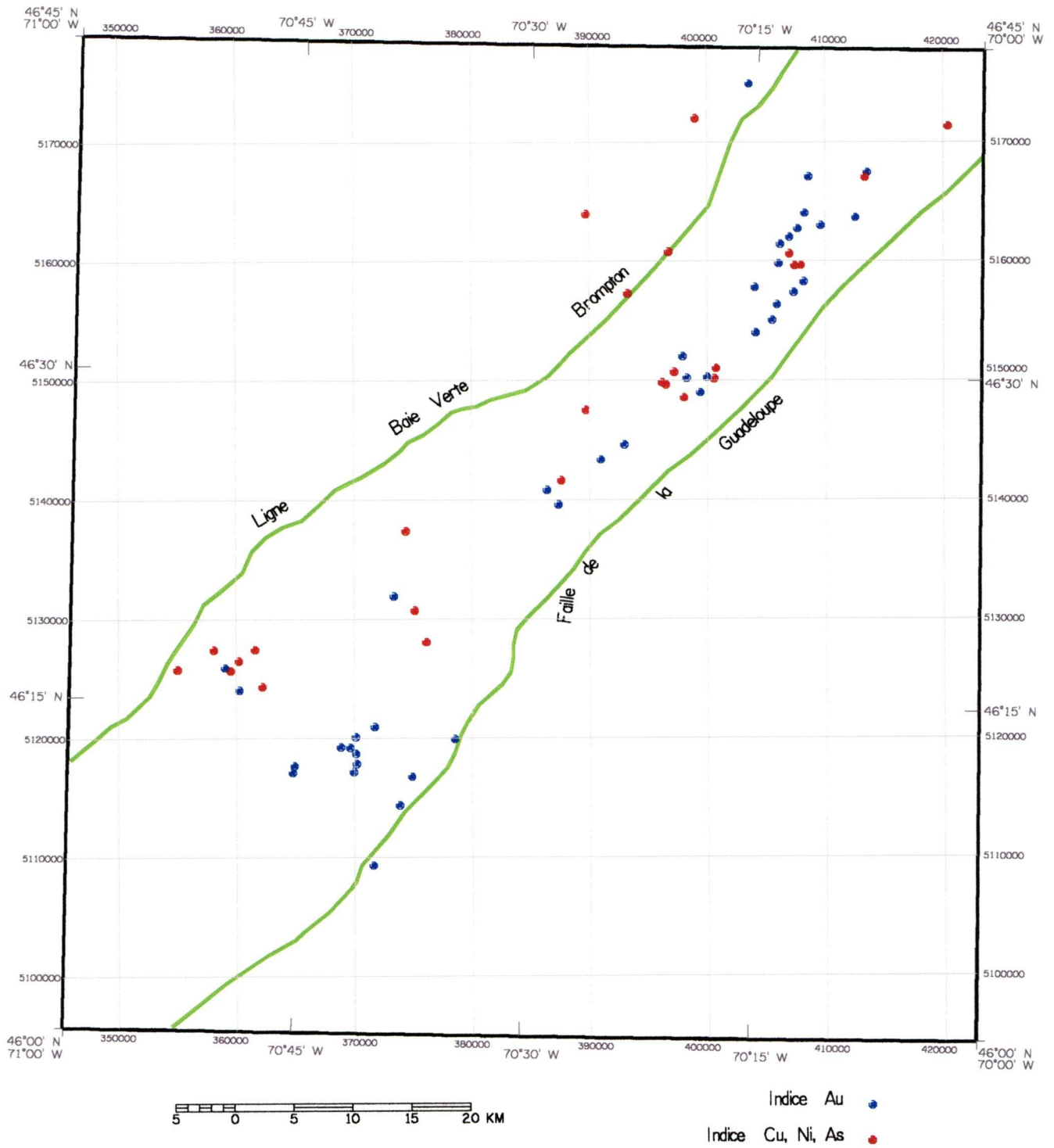


Figure 21 – Localisation des indices géochimiques

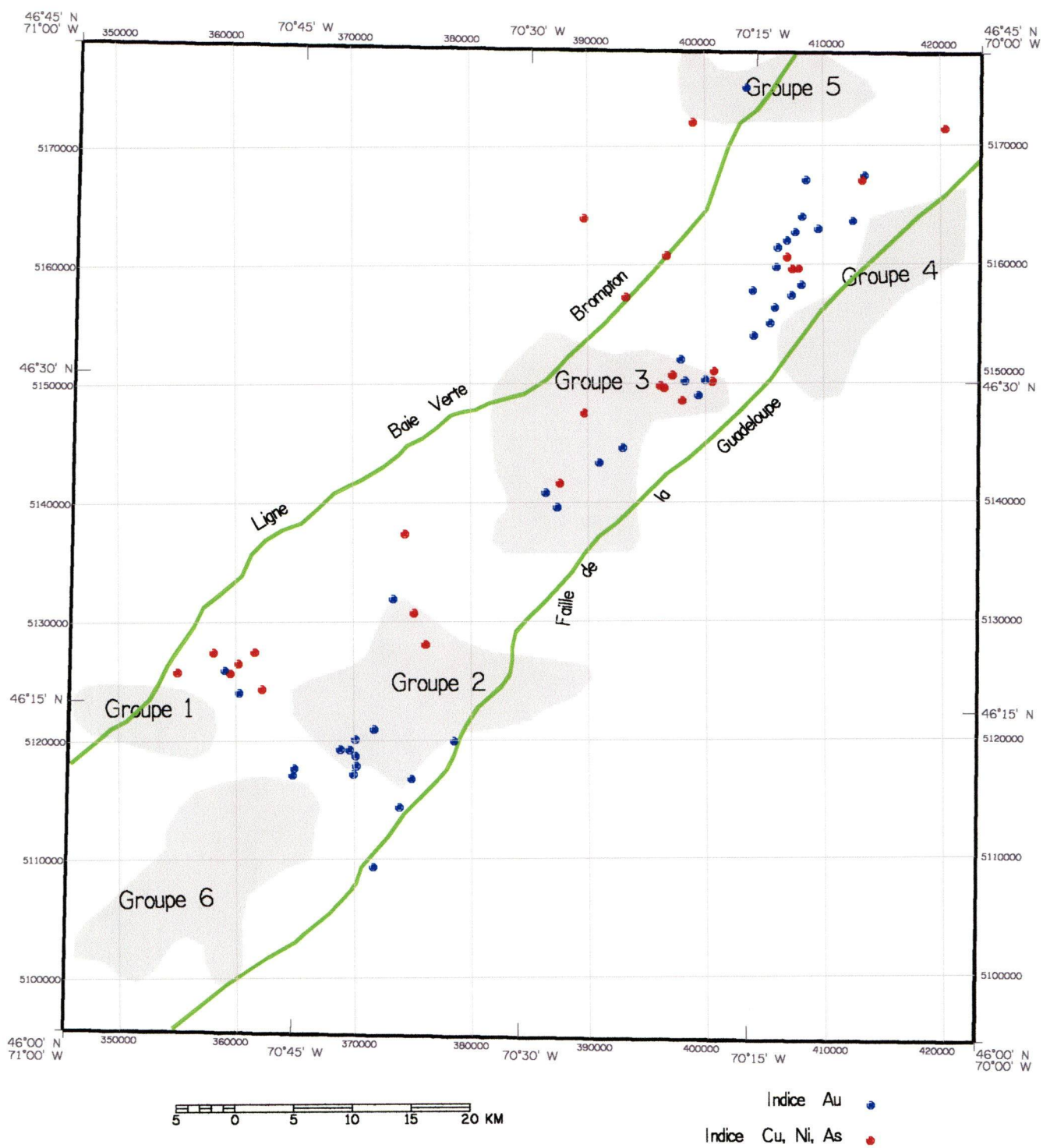


Figure 22 – Voisinage de résidus positifs et indices géochimiques

6. Discussion

Les caractéristiques de la carte des linéaments ont été mises en évidence et analysées au chapitre précédent. Ces caractéristiques peuvent être interprétées et commentées en fonction des structures géologiques et de l'histoire tectonique connue de la région.

6.1. Interprétation structurale

Une première interprétation découle de l'examen du tableau 4 où l'on observe que la densité linéaire moyenne des linéaments du synclinorium de Connecticut Valley – Gaspé est inférieure de 34 % à celle des deux autres domaines géologiques combinés. Ces deux autres domaines ont pratiquement la même densité linéaire, c'est-à-dire environ $1\,440\text{ m} \cdot \text{km}^{-2}$. Le fait que le Groupe de Caldwell soit inclus dans le domaine océanique malgré qu'il appartienne en fait à celui des nappes internes est ici sans conséquence. Il en serait autrement si un changement de la densité linéaire était présent au passage de la ligne Baie-Verte – Brompton. Dans l'hypothèse où les linéaments présents sur notre carte ont essentiellement pour origine les structures géologiques cela indique une différence structurale par rapport aux deux autres domaines. Il est raisonnable de relier cette différence au fait que le synclinorium n'a subi que la seule orogénèse Acadienne.

L'orientation des linéaments dans l'ensemble de la carte montre deux composantes majeures orientées à 90° l'une de l'autre. Ceci est en accord avec l'unique paragraphe faisant allusion à une étude par « imagerie Landsat » dans le document de Burzynski (1993, p.18). Il est donc pertinent de le citer :

Landsat imagery analysis of the area shows a pattern of east-west and north-south trending lineaments likely representing late brittle faults which are also reflected by offsets of airborne and ground magnetic anomalies and mapped stratigraphic offsets. Displacements are relatively small (i.e. with a maximum of 100 meters).

Cette étude par image Landsat, non publiée, n'a pu être examinée mais il semble bien qu'elle concorde avec notre carte des linéaments. Les groupes de linéaments nord-sud et est-ouest pourraient donc représenter un réseau de diaclases formées tardivement alors que la roche avait acquis un comportement fragile. Il est connu que la poussée tectonique lors des deux orogénèses s'est exercée à peu près vers le nord-ouest, soit à 45° de ces deux orientations principales. Il devient donc difficile de séparer les linéaments de la phase Taconique des linéaments de la phase Acadienne sauf dans le synclinorium de Connecticut Valley – Gaspé où, normalement, tous résultent de la phase Acadienne. Certains linéaments pourraient aussi être plus récents encore, de la phase Alléghanienne (très faiblement ressentie au Québec), ou avoir un lien avec les fractures d'extension de la marge continentale passive de l'Atlantique. Voici une autre constatation intéressante. En examinant la zone 7 de la figure 12, une portion du représentative du synclinorium, on note que la rosace no 7 associée à cette zone (figure 13) montre un angle d'environ 84° à 86° entre les deux orientations. Un angle d'environ 42° à 43° entre la direction de la poussée tectonique (et donc de la contrainte maximale) et la direction des fractures conjuguées est indicateur de roches incompetentes.

Dans la portion sud-ouest de la carte des linéaments on remarque une diminution légère de la densité linéaire. La surface de tendance le montre bien (figure 17). Il est possible d'avancer deux explications. La première est que les roches ont subi une déformation tectonique un peu moins forte à cet endroit et donc il s'y est créé un peu moins de linéaments. La deuxième tient au fait que cette portion coïncide avec le bassin hydrographique de la rivière Chaudière. Il est alors possible que le repérage des linéaments soit rendu plus difficile parce que la fréquence et l'épaisseur des dépôts Quaternaires, surtout dans la vallée de la Chaudière, les masquent en partie.

Toujours dans la portion sud, les linéaments curvilignes répartis dans la vallée de la rivière Chaudière sont probablement les seuls qu'on ne puisse relier directement aux structures géologiques. Certains de ces linéaments peuvent facilement être associés à la topographie. Pour les autres, il reste la possibilité de les associer à des formes géomorphologiques existant dans la vallée de la rivière Chaudière. On peut consi-

dérer ici des formes d'érosion ou des formes de dépôts Quaternaires et Holocènes. Une comparaison avec le contenu des cartes de la géologie du Quaternaire disponibles n'a pas permis d'associations. Le seul document suffisamment détaillé ne couvre pas la carte Beauceville (21 L / 2) mais couvre les trois autres (Chauvin *et al.*, 1976) et la carte DV 84-10 de Gaucher (1984) ne fait que reprendre des données très sommaires datant de 1964. Par exemple : on n'y voit aucun esker alors qu'ils devraient être nombreux. Il y a donc un besoin, dans ce secteur, d'une nouvelle étude sur le terrain intégrant les connaissances actuelles de la géomorphologie.

6.2. Interprétation gîtologique

Le lien entre la présence d'un indice géochimique et la proximité d'un linéament semble bien exister d'après l'examen des cartes de l'annexe 1. La carte des linéaments présente donc une utilité pour la prospection si on la considère sous cet aspect. C'est d'ailleurs un fait généralement admis en prospection minière que la proximité d'un linéament est un indice favorable tant à l'échelle régionale qu'à l'échelle locale, à l'intérieur d'une exploitation par exemple. Cependant, une preuve statistique, en utilisant le test du t indépendant de Student, ne peut être établie à partir des indices disponibles.

L'autre type de lien, à caractère zonal, qui a été recherché s'est avéré difficile à identifier. La concordance entre indices géochimiques et zones de résidus positifs élevés est très vague et même pratiquement absente. Seuls les résidus du groupe 3 de la figure 22 s'apparient avec un groupe d'indices. Si on regarde cellule par cellule, il y a autant d'indices dans des cellules à résidus négatifs que d'indices dans des cellules à résidus positifs. Ceci s'explique peut-être par la nature fragmentaire des données géochimiques disponibles. Elles sont en effet composées d'indices de minéralisation connus (prospects), d'analyses de sédiments de ruisseaux et, en plus, de quelques sites de placers importants exploités autrefois. Les cartes (du présent mémoire) de Sainte-Justine et de Saint-Magloire contiennent des emplacements de

stockwerk et de lentilles minéralisées importantes indiquées sur les cartes MB 92-02 et MB 92-03 de Marquis (1992, 1992a).

6.3. Discussion sur l'image RSO

Les images RSO présentent de nombreux avantages. Elles peuvent être prises de jour comme de nuit et ne sont pas affectées par la couverture nuageuse. En général, pour la recherche de linéaments géologiques, les images choisies sont celles captées avec un angle de visée élevé. Il peut même être très élevé dans le cas d'images provenant de capteurs aéroportés. On cherche à mettre en évidence la topographie. On obtient ainsi des cartes où l'origine des linéaments tient surtout au relief. Dans le cas de notre image RSO, l'angle de visée est plutôt moyen. On peut s'attendre, dans ce cas, à une moins bonne détection des éléments topographiques.

Si on considère la résolution comme facteur pouvant influencer la visibilité des linéaments l'image RSO devrait normalement faire mieux qu'une image TM. L'espacement des pixels devrait également favoriser l'image RSO. La faiblesse relative de l'extraction des linéaments dans notre image RSO pourrait se justifier par un angle de visée trop faible. Le mode de faisceaux pourrait être une autre raison, la résolution diminuant lorsqu'on passe successivement du mode haute résolution au mode standard puis au mode large. Le manque de travaux antérieurs utilisant le même type d'image RSO (mode large 2) ne permet pas de faire de comparaisons. Le mode préférable et l'angle de visée adéquat pour la visibilité des linéaments restent donc à déterminer. La documentation de RADARSAT International recommande les faisceaux haute résolution ou standard avec angle de visée élevé pour les applications à caractère géologique.

Un facteur pouvant influencer une recherche en ce sens est le dilemme entre résolution spatiale et résolution radiométrique. Il est expliqué par Ulaby et Dobson (1989). Il fait intervenir le nombre de vues ' n ' (look number) comme facteur affectant la visibilité dans une image. En effet, si l'on augmente le nombre de vues lors du traitement des

données brutes du capteur, la visibilité, et donc la résolution, augmente. Ceci en autant que l'on puisse conserver le même espacement de pixel, ce qui n'est probablement pas le cas dans les images de RADARSAT. Ce genre de produit (*i.e.* une image avec $n=12$) n'est pas disponible chez RADARSAT International. Par conséquent, une recherche en ce sens exigera de se procurer une image brute de RADARSAT-1 et de disposer du logiciel de prétraitement approprié.

6.4. Discussion sur l'image TM

Malgré la présence, sur une partie de l'image, de nuages de haute altitude qui la rendait impropre à plusieurs traitements, il a été possible d'extraire une quantité de linéaments représentatifs suffisants pour pouvoir en tirer de l'information. Ceci peut s'interpréter de deux façons. La première est que la géologie présente sous le paysage influence celui-ci au point qu'il est facile d'en faire ressortir de nombreux éléments. C'est ce qui est affirmé au début de ce mémoire. La deuxième interprétation est que les images infrarouges sont bien adaptées à une utilisation à caractère géologique. En effet, même avec des images MSS de Landsat 3, dont le pixel est de 79 m, il a été possible d'obtenir d'excellents résultats (Lord *et al.*, 1996; Pouliot, 1987). Il semble que les caractéristiques physiques propres aux bandes infrarouges sont un élément plus important dans cette visibilité que la taille du pixel.

On peut se demander quels phénomènes sont responsables de la visibilité des linéaments géologiques. La topographie est une bonne explication dans plusieurs cas. L'interaction entre linéaments et végétation est certainement un facteur important. Ce lien entre végétation et linéament peut exister sous de nombreuses formes. Nous n'avons pas trouvé d'étude s'attardant en profondeur sur ce point précis. On peut voir ici un bon sujet pour une étude ultérieure. Une recherche à partir d'images prises à différents moments de la saison végétative, avec une étude sur le terrain, permettrait d'en savoir plus sur cette interaction.

7. Conclusion

Dans l'ensemble le bilan de ce projet de recherche est positif. On peut considérer l'objectif principal atteint, en ce sens que les structures géologiques sont maintenant mieux définies par l'apport d'une carte des linéaments et de son interprétation. La carte des linéaments obtenue semble être la première couvrant méthodiquement cette région et elle est donc perfectible. Une recherche couvrant un territoire plus grand ou visant à une détection plus complète des linéaments est recommandable. Cette recherche peut se faire aussi bien avec des images RSO que des images TM.

Dans le cas d'une étude par image RSO, il est suggéré d'utiliser des images captées dans les différents modes de faisceaux de RADARSAT-1 afin de pouvoir faire une étude comparative. Une telle étude devrait accorder une grande importance à la résolution radiométrique des images comme facteur influençant la visibilité des linéaments.

Dans le cas d'une étude par image TM, nous suggérons de privilégier les images TM ou ETM+ en bande infrarouge et proche infrarouge et d'utiliser une séquence multi-date en fonction du moment dans la saison végétative. Les périodes à favoriser sont au printemps juste avant l'apparition des feuilles, au début de l'été, à la fin de l'été et à l'automne juste avant les premières neiges. Ceci permettrait de préciser quels phénomènes rendent les linéaments visibles et quel est le meilleur moment pour capter une image plus riche en information sur la géologie dans des régions tempérées.

Il faut bien, pour terminer, revenir sur les considérations qui ont guidées le cheminement de ce projet. L'approche utilisée proposait une intégration de moyens ayant pour but de mieux connaître le sujet d'étude. La télédétection est en fait un outil d'observation de la Terre dont les données recueillies posent un problème d'interprétation. L'attitude adoptée est en accord avec ce que dit Poupard (1986) de la télédétection :

« La question n'est donc pas de savoir s'il faut ou non utiliser les techniques modernes d'observation de la Terre, mais de savoir comment le faire et pourquoi. »

8. Références

Arlegui, L.E. and Soriano, M.A. (1998) Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain). *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 16, p. 3169-3185.

Babu Madhavan, B., Venkataraman, G., Shah, S.D. and Krishna Mohan, B. (1997) Revealing the geology of the Great Nicobar Island, Indian Ocean, by the interpretation of airborne synthetic aperture radar images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 13, p. 2723-2742.

Bode, T., Breunig, M. and Cremers, A.B. (1994) First Experiences with GEOSTORE, an Information System for Geologically Defined Geometries. *International Workshop on Advanced Research in GIS, IGIS '94, Monte Verita, Ascona, Switzerland*, 28 février-4 mars 1994, Springer-Verlag (ed), Berlin, p. 35-44.

Bonn, F. et Rochon, G. (1993) *Précis de télédétection*. Volume 1, Presses de l'Université du Québec, Québec, 485 p.

Budkewitsch, P., Newton, G. and Hynes, A.J. (1994) Characterization and extraction of linear features from digital images. *Journal canadien de télédétection*, vol. 20, no. 3, sept. 1994, p. 268-279.

Burzynski, J. F. (1993) The Bellechasse gold deposits, Quebec : Further discovery potential and economic criteria for open-pit gold mining in Southern Quebec. Queen's University, Kingston, Ontario, 84 p. (mémoire de maîtrise).

Chatterjee, R.S., Roy, J. and Bhattacharya, A.K. (1996) Mapping geological features of the Jharia coalfield from Landsat-5 TM data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 16, p. 3257-3270.

Chauvin, L., Martineau, G. et Lasalle, P. (1976) *Géologie des sédiments meubles d'une partie de la Beauce et du Bas Saint-Laurent*. DPV-438, prospects Québec, 19 p., 2 cartes.

Cousineau, P.A. (1990) Le Groupe de Caldwell et le domaine océanique entre Saint-Joseph-de-Beauce et Sainte-Sabine. MM-87-02, Ministère de l'Énergie et des Ressources (Mines), 165 p., 4 cartes.

Cousineau, P.A. (1987) *Géologie économique du secteur entre Saint-Joseph-de-Beauce et Sainte-Sabine-de-Bellechasse*. MB-87-22, Ministère de l'Énergie et des Ressources, 45 p., 4 cartes.

Cousineau, P.A. (1986) Le domaine océanique entre Saint-Camille-de-Bellechasse et Lac-Frontière. MB 86-25, Service de la géologie, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Gouvernement du Québec. 48 p.

Cousineau, P.A. (1984) La Formation de Saint-Daniel et le Groupe de Magog entre St-Georges-de-Beauce et Lac-Etchemin. MB 84-09, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Gouvernement du Québec. 95 p., 1 carte.

Daultrey, S. (1976) Principal Components Analysis. Concepts and Techniques in Modern Geography, no 8, Geo Abstracts Ltd, University of East Anglia, Norwich, U.K., 51 p.

De Sève, D., Toutin, T. et Desjardins, R. (1996) Évaluation de deux méthodes de correction géométrique d'images Landsat TM et ERS-1 RAS dans une étude de linéaments géologiques. Journal canadien de télédétection, vol. 17, no. 1, p. 131-142.

Deslandes, S. (1988) Méthode de détection des linéaments géologiques : comparaison des images SEASAT et SPOT. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 62 p.

Deslandes, S. et Gwyn, Q.H.J., (1991) Évaluation de Spot et Seasat pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse de spectre de Fourier. Journal canadien de télédétection, avril 1991, vol. 17, no. 2, p. 98-110.

Foucault, A. et Raoult, J.F. (1992) Dictionnaire de géologie. 3^{ième} édition, Masson (éd.), Paris, 352 p.

Fraipont, P. et Hirsch, J. (1984) Analyse linéamentaire: procédure de traitement de données télédétectées. Colloque Int. on Computers in Earth Sciences for Natural Resource Characterization, Nancy, France, avril 1984.

Gaucher, E. (1984) Carte de la compilation de la géologie du Quaternaire. DV 84-10, feuillet Beauceville 21 L/2, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la géoinformation, Québec.

Gauthier, M., Auclair, L., Bardoux, M., Blain, M., Boisvert, D., Brassard, B., Chartrand, F., Darimont, A., Dupuis, L., Durocher, M., Gariépy, C., Godue, R., Jebrak, M., et Trottier, J. (1989) Synthèse métallogénique de l'Estrie et de la Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec, MB 89-20, 633 p.

Hobbs, W.H. (1912) Earth features and their meaning. Macmillan Co. (ed), New-York, 506 p.

Jensen, J.R. (1996) Introductory Digital Image Processing, A remote sensing perspective. Prentice-Hall (ed), New-Jersey, 247 p.

Joshi, A.K. (1989) Automatic detection of lineaments from Landsat Data. 12e Symposium Canadien sur la Télédétection, IGARSS 89, Vancouver, 10-14 juillet 1989, vol. 1, p. 85-88.

Karpuz, M.R., Roberts, D., Olesen, O., Gabrielsen, R.H. and Herrevold, T. (1993) Application of multiple data sets to structural studies on Varanger Peninsula, Northern Norway. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, no. 5, p. 979-1003.

Lattman, L.H. (1958) Technique of mapping geologic fracture traces and lineaments on aerial photographs. *Photogrammetric Engineering*, vol. 24, p. 568-576.

LaSalle, P. (1992) L'or dans les sédiments meubles : formation des placers, extraction et occurrences dans le sud du Québec. DPV-745, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction des levés géoscientifiques, Québec, 23 p., 1 carte.

Laurini, R. and Thompson, D. (1992) *Fundamentals of Spatial Information Systems*. Academic Press (ed), London, 700p.

Lord, J., Oliver, G.H.J., and Soulsby, J.A. (1996) Landsat MSS imagery of a Lower Cretaceous regional dyke swarm, Damaraland, Namibia: a precursor to the splitting of Western Gondwana. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 15, p. 2945-2954.

Mah, A., Taylor, G.R., Lennox, P. and Balia, L. (1995) Lineament Analysis of Landsat Thematic Mapper Images, Northern Territory, Australia. *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, vol. 61, no. 6, juin 1995, p. 761-773.

Marquis, R. (1997) Communication personnelle. Secteur des mines, Ministère des Ressources naturelles du Québec, (819) 825-7514, sgno@lino.com

Marquis, R. (1992) Carte de la compilation géologique et métallogénique du feuillet de Saint-Magloire (21 L/09). MB 92-03, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.

Marquis, R. (1992a) Carte de la compilation géologique et métallogénique du feuillet de Sainte-Justine (21 L/08). MB 92-02, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.

Miller, R.L. and Kahn, J.S. (1958) *Statistical analysis in the geological sciences*. John Wiley and Sons Inc. (ed), New-York, 389 p.

Mines d'Or Virginia (1997) Communication personnelle. M. Paul Archer, Québec, (418) 694-9832, mines@virginia.qc.ca

Moore, G.K. and Waltz, F.A. (1983) Objective Procedure for Lineament Enhancement and Extraction. *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, vol. 49, no. 5, mai 1983, p. 641-647.

Mostafa, M.E. and Zakir, F.A. (1996) New enhancement techniques for azimuthal analysis of lineaments for detecting tectonic trends in and around the Afro-Arabian Shield. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 15, p. 2923-2943.

Nguyen, X. and Ho, Y. (1988) Digital Image Processing in Remote Sensing. J.-P. Muller (ed.) Taylor and Francis (publ.), London, 327p.

Niño, F., Rivera, L. and Pion, J.C. (1993) Linear feature enhancing by Hyperbolic-Gaussian filtering. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, no. 14, p. 2617-2630.

Offield, T.W. (1975) Line-grating diffraction in image analysis : Enhanced detection of linear structures in ERTS images, Colorado Front Range. *Remote Sensing, Geophysics reprint series No 3*, Watson, Regan and Levin (ed.), p. 486-492. Réimpression de : *Modern Geology*, vol. 5, p. 101-107, 1975.

O'Leary, D. W., Friedman, J.D. and Pohn, H.A. (1976) Lineament, linear, lineation : Some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, octobre 1976, vol. 87, pp.1463-1469.

Pouliot, G. (1987) Intégration de données satellites dans l'évaluation de cibles de prospection minière dans la bande volcano-sédimentaire Ascot-Weedon, Cantons de l'Est, Québec. *Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke*, 64 p.

Poupard, J.-P. (1986) Libres réflexions sur la télédétection. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, no. 104 (1986-4), p. 5-15.

Raghavan, V., Masumoto, S., Koike, K. and Nagano, S. (1995) Automatic lineament extraction from digital images using a segment tracing and rotation transformation approach. *Computers and Geosciences*, vol. 21, no. 4, p. 555-591.

Russ, J.C. (1995) *The Image Processing Handbook*. CRC Press (ed), Boca Raton, 674 p.

Saint-Jean, R. (1991) Analyse structurale et lithologique d'une image radar en bande C, région de l'inlet de Bathurst, T.N.O. (Nunavut) Canada. *Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke*, 76 p.

Scanvik, J.-Y. (1986) *Télédétection aérospatiale et informations géologiques*. Éditions BRGM, Orléans, France, 388 p.

Shi, Z. and Fung, K.B. (1994) A Comparison of Digital Speckle Filters. *IGARSS 94*, T. I. Stein (ed.), California Institute of Technology, 8-12 août 1994, p. 2129-2133.

St-Julien, P. et Slivitzky, A. (1987) *Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce*. Publication MM 85-04, Ministère de l'Energie et des Ressources, Gouvernement du Québec, Québec, 41 p. , 1 carte.

Süzen, M.L. and Toprak, V. (1998) Filtering of satellite images in geological lineament analyses : an application to a fault zone in Central Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, avril 1998, vol. 19, no. 6, p. 1101-1114.

Thouez, J.-P., Castonguay, J. et Clément, P. (1976) L'analyse des surfaces de tendance : application en géographie humaine et physique. Bulletin de recherche no 30, Novembre 1976, Département de géographie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 61 p.

Toutin, T. (1998) Évaluation de la précision géométrique des images de RADARSAT. Journal canadien de télédétection, mars 1998, vol. 24, no. 1, p. 80-88.

Toutin, T. (1996) La correction géométrique rigoureuse : un mal nécessaire pour la santé de vos résultats. Journal canadien de télédétection, juin 1996, vol. 22, no. 2, p. 184-189.

Ulaby, F.T. and Dobson, M.C. (1989) Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. Artech House, Inc. (ed), Norwood, Mass.

Unwin, D.J. (1976) An introduction to trend surface analysis. Concepts and Techniques in Modern Geography, no 5, Geo Abstracts Ltd, University of East Anglia, Norwich, U.K., 40 p.

Wang, J.F. (1993) LINDA- A system for automated linear features detection and analysis. Journal canadien de télédétection, janvier 1993, vol. 19, no. 1, p. 9-21.

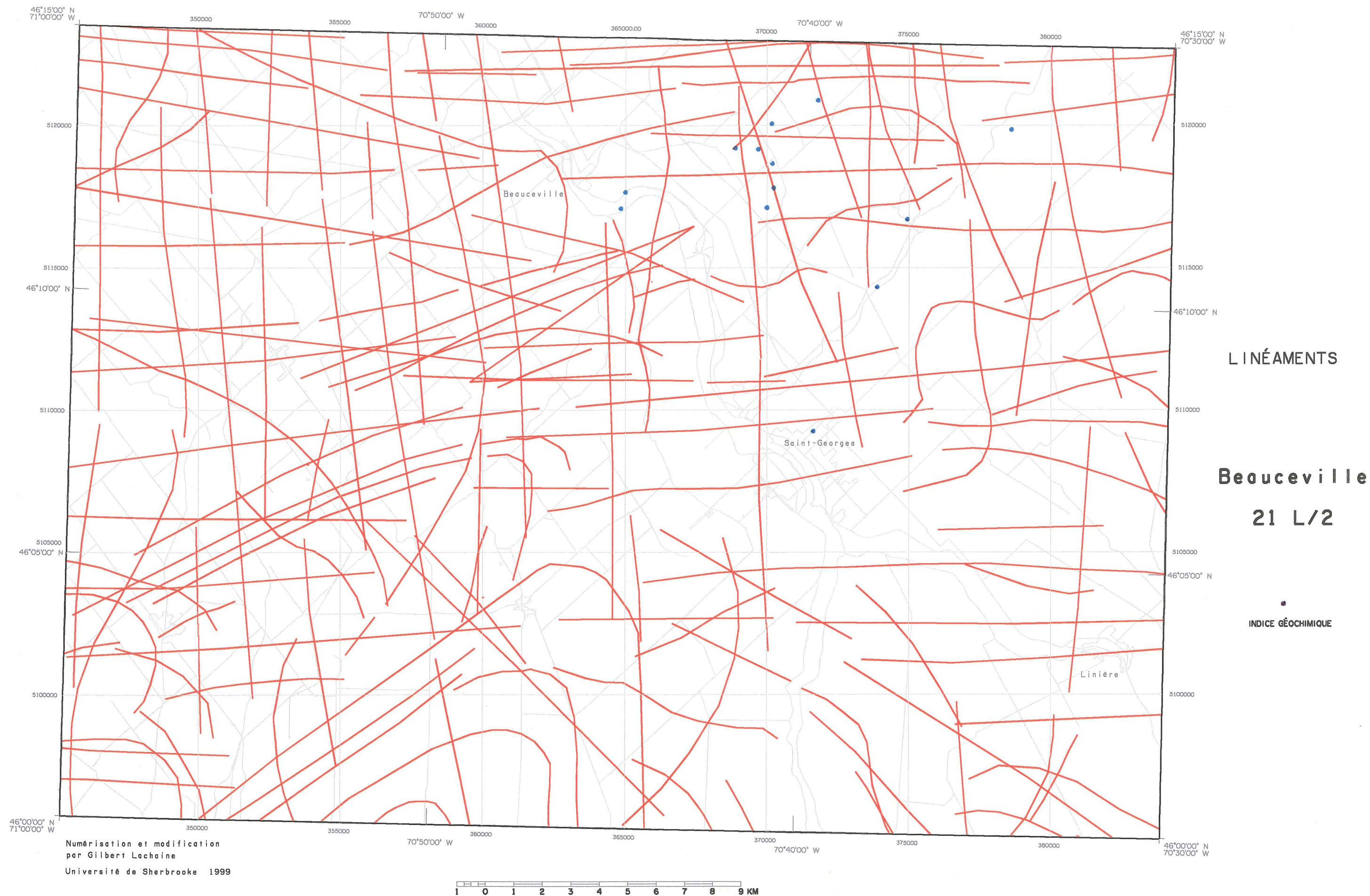
Wang, J.F. and Howarth, P.J. (1990) Use of the Hough Transform in Automated Lineament Detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, juillet 1990, vol. 28, no. 4, p. 561-566.

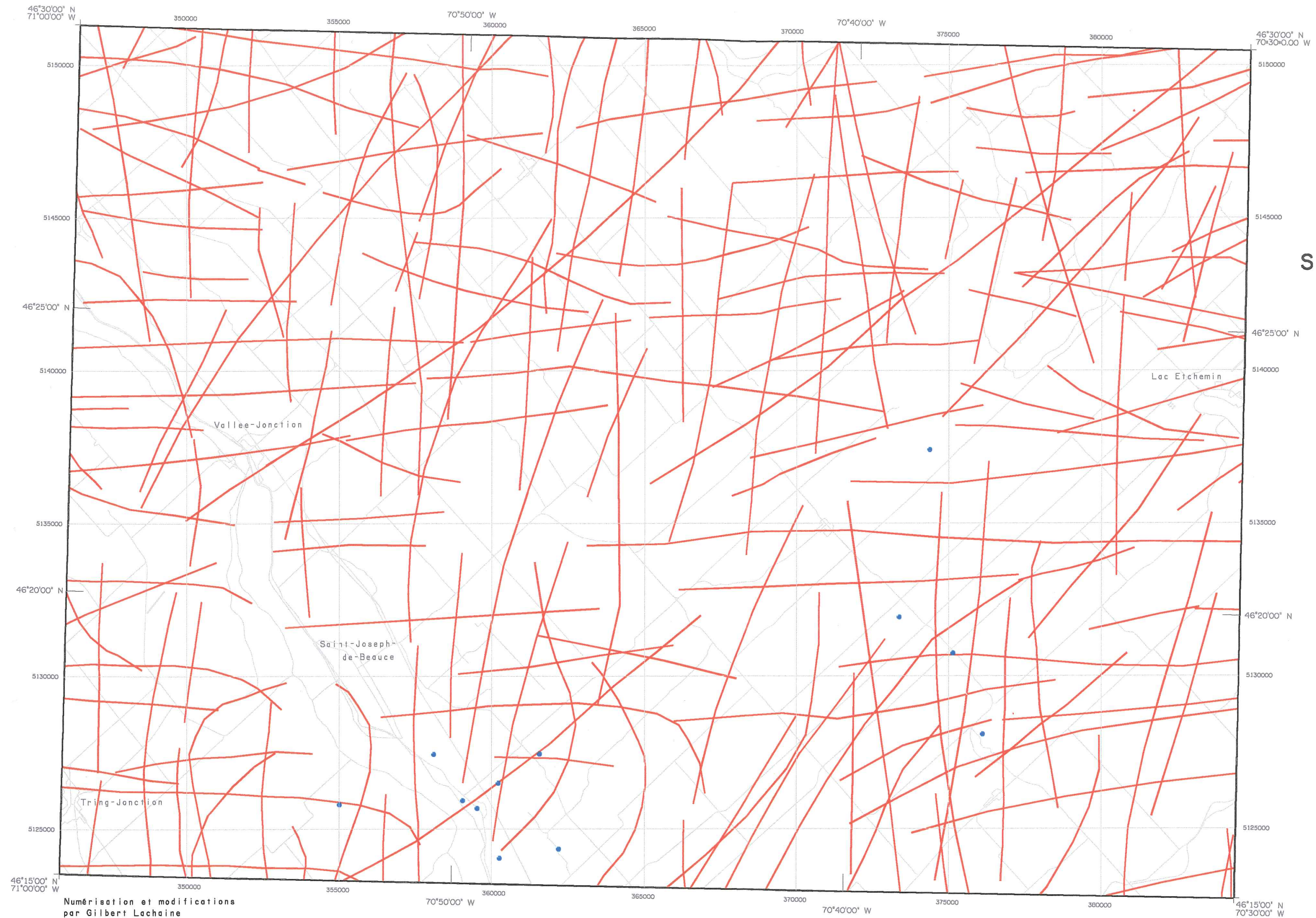
Wilkinson, G.G. (1996) A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data. International Journal of Geographical Information Systems, Taylor & Francis (ed), vol. 10, no. 1, jan.-fév. 1996, p.85-101.

Williams, H. (1979) Appalachian Orogen in Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 16, p. 792-807.

Annexe 1

Cartes à l'échelle de 1: 125 000





**Saint-Joseph-
de-Beauce**

21 L/7

L'INÉAMENTS

INDICE GÉOCHIMIQUE





LINÉAMENTS

INDICE GÉOCHIMIQUE

Sainte-Justine
21 L/8

Numérisation et modification
par Gilbert Lachaine
Université de Sherbrooke 1999



